급액가열기, 재생기를 적용한 유기랭킨사이클(ORC)의 열역학적 효율에 관한 해석적 연구

박 창 용†, 홍 웅 기, 김 정 민
서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부

Thermodynamic Efficiencies of Organic Rankine Cycles with a Feed Liquid Heater or Regenerator

Chang Yong Park†, Woong-Ki Hong, Jung-Min Kim
Department of Mechanical Design and Automation Engineering,
Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received July 25, 2011; revision received September 14, 2011)

ABSTRACT: A numerical study was performed for thermodynamic efficiencies of a basic ORC (Organic Rankine Cycle), ORC with a FLH (Feed Liquid Heater), and ORC with a regenerator. The efficiencies of the basic ORC were higher in the order of R113, R123, R245ca, and R245fa for its working fluids. It was confirmed that an optimal FLH pressure existed to maximize efficiency of the ORC with a FLH. A correlation was developed to predict the optimal FLH pressure as a function of evaporation and condensation pressure and its average absolute deviation was 0.505%. The efficiency enhancement of the basic ORC with a FLH was higher than that with a regenerator. It was presented that the basic ORC efficiency could be improved more than 10% by a FLH with 30℃ condensation and over 110℃ evaporation temperatures.

Key words: Organic Rankine Cycle(ORC, 유기랭킨 사이클), Feed Liquid Heater(FLH, 급액가열기), Regenerator(재생기), Thermodynamic efficiency(열역학적 효율)

기 호 설 명

h : 엔탈피 [kJ/kg]
P : 압력 [MPa]
q : 단위질량 당 열전달 양 [kJ/kg]
T : 온도 [℃]
w : 단위질량 당 일 [kJ/kg]

그리스 문자

η : 열역학 1법칙 효율
η_s : 등엔트로피 효율

하첨자

a : 효율을 고려한 과정
cond. : 응축
evap. : 증발
FLH : 급액가열기(Feed Liquid Heater)
opt. : 최적조건
ORC : 유기랭킨사이클
p : 펌프
regen. : 재생기
s : 등엔트로피 과정
t : 터빈

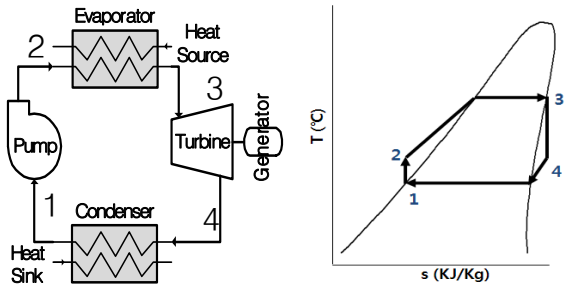
† Corresponding author
Tel.: +82-2-970-6360; fax: +82-2-974-8270
E-mail address: cypark@snut.ac.kr

1. 서 론

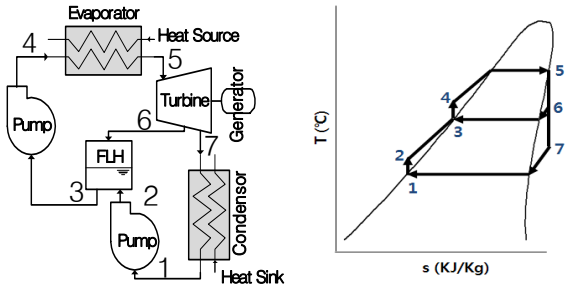
전 세계적으로 환경과 관련된 규제가 강화됨에 따라, 다양한 신재생 및 폐열 에너지를 이용한 전력생산에 대한 관심이 증가하고 있다. 이와 관련하여 최근 주목받는 전력생산 방법 중 하나가 유기랭킨사이클(ORC : Organic Rankine Cycle)을 활용한 발전 시스템이다. ORC는 기존 랭킨사이클의 수증기 발생에 적합하지 않은 80℃~400℃ 영역의 저온열원을 이용하는 발전 시스템으로 Schuster et al.[1]이 언급한 것과 같이 지열, 열병합 발전시스템 폐열, 태양열, 내연기관 배기가스, 공장폐열 등이 ORC의 열원으로 사용 가능하다.

저온의 열원으로 발전이 가능한 특성 때문에 근래 ORC에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. Saleh et al.[2]는 다양한 작동유체에 따른 ORC의 성능을 비교하였으며, Hettiarachchi et al.[3]는 약 90℃의 온수를 열원으로 하는 경우 기본 ORC의 최적 작동유체는 R123이며 시스템 전체 효율은 6~10%라 언급하였다. 기본 ORC의 간단한 구성도와 작동에 관한 T-s 선도가 Fig. 1(a)에 제시되어 있다. ORC가 갖는 단점은 다른 열역학 사이클에 비해 상대적으로 낮은 효율이라 할 수 있다. 기본 ORC의 낮은 효율을 극복하기 위해 크게 2가지 방법이 제시되었는데 급액가열기(FLH, Feed Liquid Heater)를 Fig. 1(b)와 같이 적용하거나, Fig. 1(c)에서 보여주는 것과 같이 재생기(Regenerator)를 사용하는 것이다. 최근 ORC 관련 연구는 급액가열기[4]나 재생기를 사용하는 시스템 성능을 시뮬레이션을 통해 예측하는 내용이 다수이며, 태양열,[5] 지열,[6] 배기가스 폐열[7] 등 다양한 열원을 이용하는 ORC의 성능예측에 관한 연구가 진행되었다.

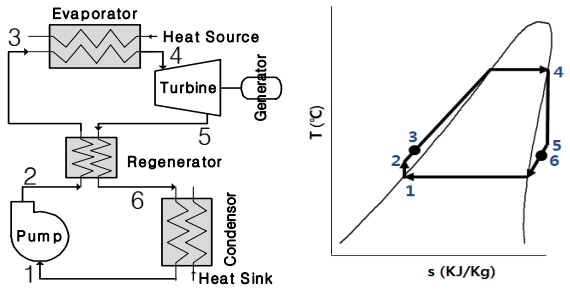
하지만, ORC에 급액가열기 또는 재생기를 사용하는 경우 다양한 증발기 온도조건에서 시스템의 열역학적 효율 변화에 대한 정량적 비교 연구가 부족한 상황이다. 또한 급액가열기를 사용하는 경우 터빈에서 급액가열기로 공급되는 과열증기의 압력에 따라 시스템의 효율이 달라지지만, 이에 관한 연구도 미진하다. 따라서 본 논문에서는 기본 ORC, 급액가열기 또는 재생기를 적용한 ORC의 효율을 비교하였으며, 급액가열기 압력변화에 따른 ORC의 효율변화, 최적 급액가열기 압력에 대한 결과 및 최적압력을 계산하는 상관식을 제시하였다. 작동유체로는 R113, R123, R245fa, R245ca, isobutane, R227ea, 그리고 R134a를 고려하였다.



(a) Basic ORC



(b) ORC with FLH(Feed Liquid Heater)



(c) ORC with regenerator

Fig. 1 Basic ORC and ORC with regeneration.

2. 시스템 모델 및 시뮬레이션

본 논문에서 고려한 사이클은 Fig. 1(a)~Fig. 1(c)와 같다. Fig. 1(a)로 도시된 이상적인 기본 ORC는 펌프, 증발기, 터빈, 응축기로 구성되어 있고, 압축과정(1-2), 등압가열과정(2-3), 팽창과정(3-4), 등압냉각과정(4-1)을 갖는다. Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)은 각각 급액가열기와 재생기가 적용된 ORC를 보여준다. 급액가열기(FLH)는 터빈에서 팽창하는 고온증기의 일부를 유출시켜 액체상태의 작동유체를 가열과정(2-3)하며, 재생기(Regenerator)는 터빈에서 유출되는 고온의 기체를 이용하여 증발기로 유입되는 액체를 가열과정(2-3)한다.

작동 유체는 최근 연구동향에 맞추어 선택되었다. R113과 R123은 기존의 연구[3, 4]에서 저온열원을 이용하는 ORC에 적합한 작동유체로 언급되었다. 그러

Table 1 Several properties of working fluids

Fluid	M[g/mol]	Tcrit[℃]	Pcrit[MPa]
R113	187.38	214.06	3.392
R123	152.93	183.68	3.661
R245ca	134.05	174.42	3.925
R245fa	134.05	154.05	3.640
isobutane	58.12	134.67	3.640
R227ea	170.03	101.65	2.926
R134a	102.03	101.06	4.059

나 R113은 CFC 계열 냉매로 사용이 불가하며, 이를 대체하는 R123도 HCFC 계열로 2030년까지 사용을 금지하는 계획이 추진되고 있다. 따라서 R123을 대체하는 R245fa와 R245ca가 최근 ORC 연구[1, 2, 6]의 작동유체로 언급되었고, 실제 산업에서도 이용되고 있다. 그밖에도 작동유체로 Isobutane과 R227ea를 적용한 연구,[6] R134a를 적용한 연구[1]가 있었다. 작동유체의 상태량은 REFPROP[8]을 이용하여 구하였으며, 본 연구에서 고려된 작동유체에 대한 간단한 상태량이 Table 1에 제시되었다.

ORC 해석은 기본적인 열역학 1법칙 효율을 위주로 실시되었다. 시스템은 정상상태로 작동한다고 가정하였으며, 증발기와 응축기 내부에서의 압력강하는 무시하였다. 펌프와 터빈의 입구에서 작동유체는 각각 포화액체 및 포화증기 상태로 고려하였다. 터빈과 펌프의 등엔트로피 효율은 각각 80%와 85%로 가정하였다. 가정된 효율은 기존의 ORC 효율예측을 위해 발표된 문헌[1, 3-6]에서 터빈과 펌프의 등엔트로피 효율이 75~85% 범위 값으로 주어져 있음에 근거하였다. 재생기의 효율을 이상적 상태인 100%에서 시작하여 85%, 70%까지 변화시키며 ORC 효율에 미치는 영향을 예측하였다. 작동유체의 응축온도는 공랭식의 2차 유체에 의해 냉각되는 시스템을 가정하여 30℃로 고정하였다. 80℃~400℃ 영역의 열원을 사용하는 ORC의 특성을 고려하여 작동유체의 증발온도는 50℃에서 시작하여, 각 유체의 포화증기 엔트로피가 온도증가에 따라 감소하기 직전의 영역까지 변화시키며 시스템의 효율변화를 계산하였다. 고온 부분의 온도한계를 위와 같이 설정한 이유는 포화증기의 엔트로피가 온도 증가에 따라 감소하는 영역의 경우 포화 증기를 팽창시키면 액체-기체의 2상 상태로 변하여 액체가 터빈에 손상을 줄 가능성이 있기 때문이다.

ORC의 효율은 식(1)과 같이 정의된다.

$$\eta_{ORC} = \frac{w_{turbine} - w_{pump}}{q_{evaporator}} \tag{1}$$

터빈과 펌프의 등엔트로피 효율은 식(2)와 식(3)으로 정의되며, 기본 ORC, 급액가열기 적용 ORC, 그리고 재생기 적용 ORC의 열역학적 효율이 식(4), 식(5c), 식(6)로 각각 표현되었다. 각 식에서 하첨자 번호는 해당 ORC를 표현한 Fig. 1(a)~Fig. 1(c)에서 언급된 위치이다.

$$\eta_{s,t} = (h_{inlet} - h_{a,outlet})/(h_{inlet} - h_{s,outlet}) \tag{2}$$

$$\eta_{s,p} = (h_{s,outlet} - h_{inlet})/(h_{a,outlet} - h_{inlet}) \tag{3}$$

$$\eta_{ORC,basic} = \frac{(h_3 - h_{4,s})\eta_{s,t} - (h_{2,s} - h_1)/\eta_{s,p}}{(h_3 - h_2)} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} w_{t,FLH} &= w_{t,1st\ stage} + w_{t,2nd\ stage} \\ &= [(h_5 - h_{6,s}) + (1-y)(h_6 - h_{7,s})]\eta_{s,t} \end{aligned} \tag{5a}$$

$$\begin{aligned} w_{p,FLH} &= w_{p,1st\ stage} + w_{p,2nd\ stage} \\ &= [(1-y)(h_{2,s} - h_1) + (h_{4,s} - h_3)]/\eta_{s,p} \end{aligned} \tag{5b}$$

$$\eta_{ORC,FLH} = (w_{t,FLH} - w_{p,FLH})/(h_5 - h_4) \tag{5c}$$

$$\eta_{ORC,regen} = \frac{(h_4 - h_{5,s})\eta_{s,t} - (h_{2,s} - h_1)/\eta_{s,p}}{(h_4 - h_3)} \tag{6}$$

식(5b)에서 y는 증발기를 통과하는 작동유체의 질량유량에 대한 급액가열기로 유입되는 질량유량의 비를 의미하여 식(7)와 같이 표현되고, 급액가열기에 대한 열역학 1법칙을 이용하여 유도할 수 있다. 본 연구에서 입력변수는 급액열교환기의 압력이며 이를 이용하여 h_3를 구한다. 증발압력과 터빈의 효율을 이용하여 h_6를 계산하고, 응축압력과 펌프의 효율을 이용하여 h_2를 정하면 y값을 알 수 있다. 재생기의 효율은 식(8)로 정의된다.

$$y = (h_6 - h_2)/(h_3 - h_2) \tag{7}$$

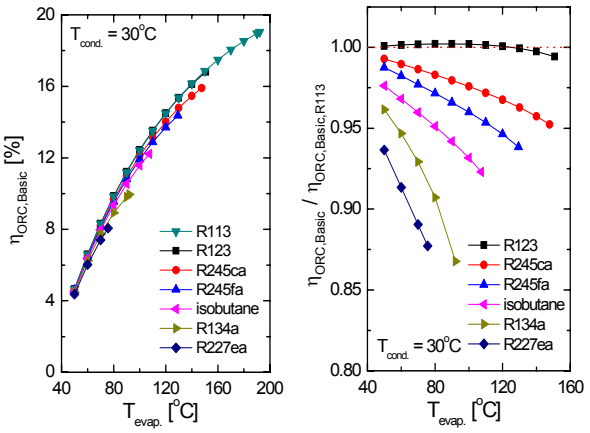
$$\eta_{regen} = (h_3 - h_2)/(h_5 - h_{6\,at\ T = T_2}) \tag{8}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 기본 ORC 효율

Fig. 2(a)는 증발온도 변화에 따른 기본 ORC의 이론적 효율변화를 보여주고 있다. 응축온도가 30℃로 고정되어 있기 때문에 증발온도가 증가함에 따라 터빈 입출구의 엔탈피 차가 커지므로 효율이 증가

함을 알 수 있다. 증발온도가 50℃인 경우 모든 작동유체에 대해 효율은 약 4.4~4.7%이며, 온도가 증가함에 따라 효율차가 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 2(b)는 각 작동유체가 갖는 효율을 R113의 효율로 나누어 그 값을 표현한 것이다. R123은 R113에 비해 증발온도 50~120℃ 에서는 미세하게 높은 효율을, 120℃ 이상의 온도에서는 더 낮은 기본 ORC효율을 갖도록 하며 효율의 차이는 온도가 증가할수록 커지는 것을 보여준다. 나머지 작동유체를 적용한 기본 ORC 효율은 R123과 R113를 적용한 경우에 비해 낮은 이론적 효율을 가지며, 효율의 차이는 증발온도가 증가함에 따라 최대 약 14%까지 커진다.



(a) Efficiency (b) Efficiency ratio

Fig. 2 ORC efficiency and its ratio change with respect to evaporation temperatures for various working fluids.

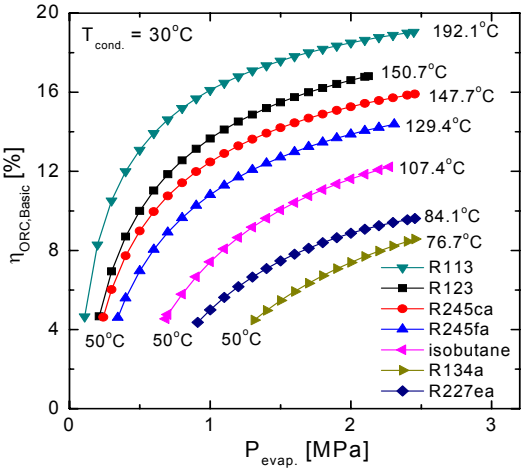


Fig. 3 ORC efficiency change with respect to evaporation pressure for various working fluids.

Table 2 Saturation pressure of working fluids

Fluid	$P_{sat.}$[MPa] ($T_{sat.}$ = 30℃)	$P_{sat.}$[MPa] ($T_{sat.}$ = 120℃)
R113	0.054	0.681
R123	0.110	1.199
R245ca	0.122	1.435
R245fa	0.179	1.921

ORC의 터빈 입출구 압력은 중요한 설계변수이다. Fig. 3는 증발 압력의 변화에 따른 기본 ORC의 효율변화를 보여준다. 동일한 압력 조건인 경우 R113을 사용하는 ORC가 가장 우수한 효율을 보여주며, R123, R245ca, 그리고 R245fa 순서로 높은 효율을 갖는다. 이는 Table 2에서 보여주는 응축온도 30℃에서 작동유체의 포화압력과 관계된다. 동일한 증발기 압력 조건에서는 응축기 압력이 낮을수록 큰 압력의 차이를 터빈이 이용할 수 있으며, 30℃ 응축온도에서 Table 2의 낮은 응축압력 순서는 Fig. 3의 동일 증발압력에서의 높은 효율 순서와 동일하다.

Fig. 4는 기본 ORC의 작동위치를 4가지 작동유체에 대해 T-h 선도위에 도시한 결과를 보여주며, 1-4로 표현된 번호는 Fig. 1(a)의 시스템 위치를 의미한다. 1과 2지점에서 온도와 엔탈피는 큰 차이가 없으므로 T-h 선도에서는 거의 동일한 지점으로 표현된다. T-h 선도를 통해 작동유체에 따라 기본 ORC의 효율이 달라지는 이유를 설명할 수 있다. 높은 ORC 효율을 위해서는 (h_3-h_4)는 크고 (h_3-h_2)는 작을수록 좋다. Fig. 4에서 각 작동유체의 (h_3-h_2)값 차이가 두드러지게 나타나며, 특히 이러한 차이는 포화

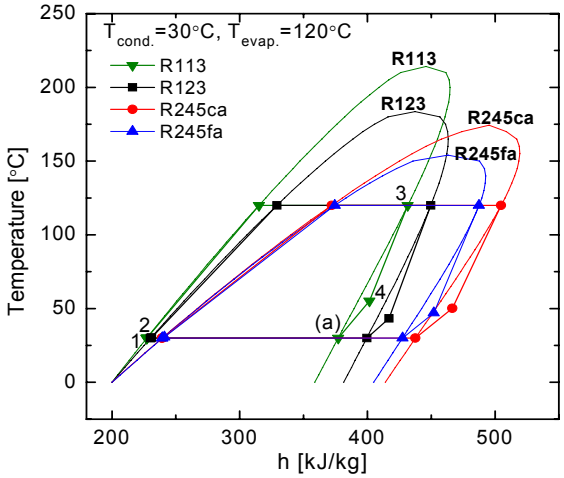


Fig. 4 Basic ORC operation for R113, R123, R245ca, and R245fa on T-h diagram.

액체의 엔탈피 변화에 따른 온도변화의 기울기에 기인함을 알 수 있다. R113의 경우 다른 작동유체에 비해 그 기울기가 크고, 이는 120℃ 포화증기를 만드는데 필요한 에너지의 감소와 ORC 효율의 증가를 가져오게 된다.

Fig. 2~Fig. 4를 통해 상대적으로 높은 효율을 갖는 작동유체가 존재함을 확인하였다. R113은 규제물질이므로, 본 연구에서 ORC 효율은 R123, R245ca, 그리고 R245fa를 위주로 분석되었다.

3.2 급액가열기 적용 ORC 효율과 최적압력

급액가열기를 적용한 ORC는 Fig. 1(b)에 도시되어있다. 터빈에서 팽창되는 작동유체의 일부가 급액가열기로 공급되어 증발기로 유입되는 유체의 온도를 상승시키게 된다. 이때 급액가열기로 공급되는 작동유체의 압력에 따라 ORC의 효율이 변하게 된다. Fig. 5는 증발온도 120℃, 응축온도 30℃인 경우 급액가열기의 압력에 따른 ORC 효율 변화를 보여주고 있으며, 제시된 세 가지 작동유체의 30℃ 및 120℃에서 포화압력은 Table 2에 제시되어 있다. Fig. 5를 통해 증발온도, 응축온도, 그리고 작동유체의 종류에 따라 효율을 최대로 하는 급액가열기의 최적압력이 존재한다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 6을 통해 급액가열기의 압력에 따라 최대의 ORC 효율이 존재하는 이유를 설명할 수 있다. 압력에 따라 작동유체의 상태량은 비선형적으로 변하기 때문에 Fig. 6(a)에서 보여주는 것과 같이 급액

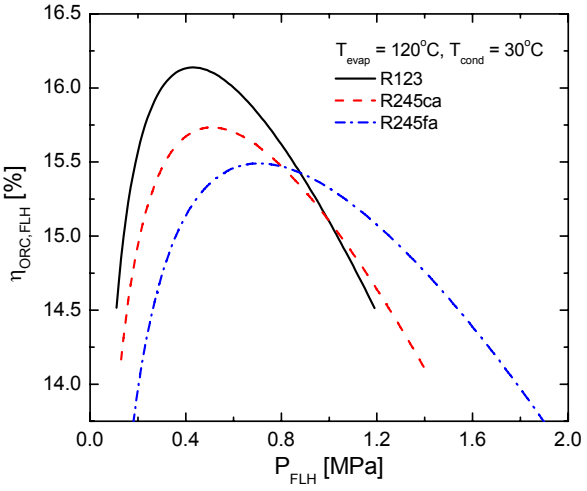
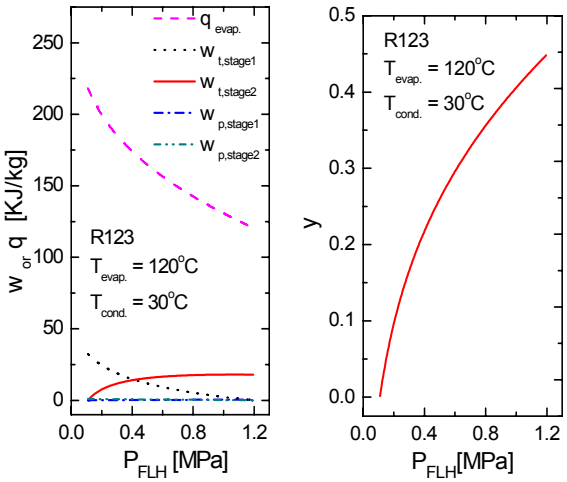


Fig. 5 Efficiency change of a ORC with FLH for the variation of FLH pressure.

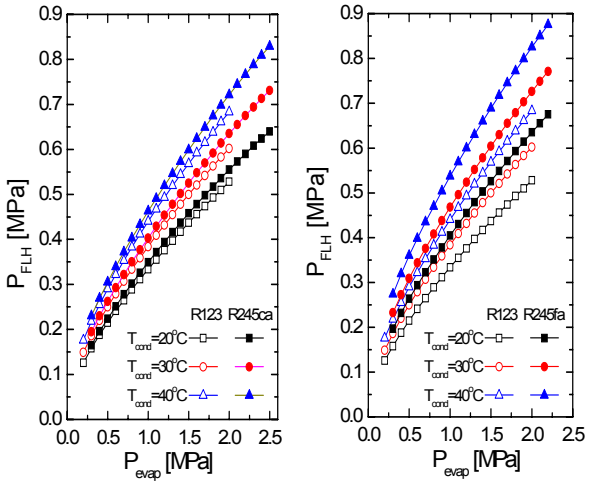


(a) q and w (b) y

Fig. 6 Change of (a) q and w (b) y for an R 123 ORC with FLH with the variation of FLH pressure.

가열기의 압력 변화에 따라 1, 2단에서의 터빈과 펌프의 일, 그리고 증발기 입력 에너지가 곡선의 형태로 변화하며, Fig. 6(b)에서와 같이 y값도 곡선의 형태로 변화한다. 따라서 식(5c)에서 제시한 급수가열기 적용 ORC 효율은 Fig. 5와 같이 효율을 최적으로 하는 급수가열기의 압력이 존재하는 형태로 나타나게 된다.

Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 응축온도가 각각 20℃, 30℃, 그리고 40℃인 경우 증발압력의 변화에 따른 급액



(a) R123 and R245ca (b) R123 and R245fa

Fig. 7 Optimal FLH pressure with the change of evaporation pressure and condensation temperature.

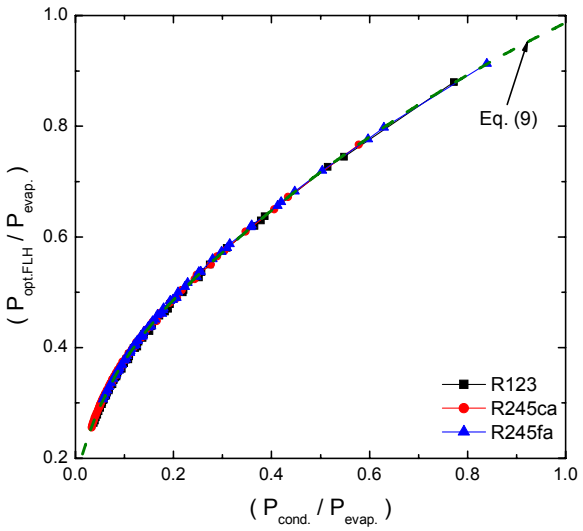


Fig. 8 Relation between($P_{opt,FLH}/P_{evap.}$) and ($P_{cond.}/P_{evap.}$).

가열기 최적압력 변화를 보여주고 있다. 증발압력이 증가함에 따라 급액가열기의 최적압력도 상승하고 있음을 보여준다. 동일 온도조건에서 증발압력은 R245fa, R245ca, R123의 순서로 높기 때문에 동일한 응축온도 조건에서 급액가열기의 최적압력 또한 같은 순서로 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

최적의 압력조건을 예측하는 상관식을 얻기 위해, Fig. 7의 데이터를 관계되는 압력의 비의 형태로 변환한 후 그래프를 그려보면 Fig. 8과 같은 표현을 얻을 수 있다. Fig. 8은 세 가지 작동유체의 종류와는 큰 차이 없이 급액가열기의 최적압력이 주어진 응축압력과 증발압력의 비율로 표현 가능함을 보여준다. Fig. 8으로부터 임의의 급액가열기 적용 ORC에서 효율을 최대화 하는 급액가열기의 최적압력은 주어진 증발 및 응축 압력에 대해 식(9)와 같이 표현된다. 식(9)에서 A = 1.5015, B = −0.1421, C = 0.0599, D = −1.1958, E = 1.1855이며, 이 식이 갖는 평균절대편차는 0.505%이다.

$$\left(\frac{P_{opt.,FWH}}{P_{evap.}}\right) = A + B\exp\left(\frac{-P_{cond.}/P_{evap.}}{C}\right) + D\exp\left(\frac{-P_{cond.}/P_{evap.}}{E}\right) \quad (9)$$

3.3 기본 및 재생과정 적용 ORC의 효율비교

Fig. 9는 기본 ORC, 재생기 적용 ORC, 그리고 급액가열기 적용 ORC의 효율이 응축온도가 30℃로 고정된 경우 증발온도의 변화에 따라 달라지는 경향을 보여준다. 효율은 급액가열기를 적용한 ORC가 가장 높으며, 재생기의 효율이 높을수록 ORC의 효율도 높다는 것을 알 수 있다. Fig. 9에서 기본 ORC의 효율대비 재생과정을 적용한 ORC의 효율향상 정도가 작동유체의 종류에 따라 달라진다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성을 더욱 분명하게 보여주는 그림이 Fig. 10이다.

Fig. 10은 재생과정을 적용한 ORC의 효율을 기본 ORC의 효율로 나눈 값이 증발온도의 증가에 따라 어떻게 변하는지를 보여주고 있다. ORC에 급액가열기를 적용하는 경우 기본 ORC의 효율을 향상시킬 수 있으며, 특히 그 증발온도가 높은 시스템일

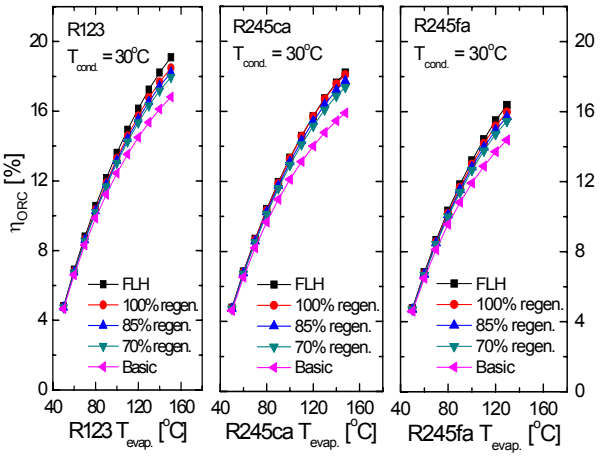


Fig. 9 ORC efficiency of basic, FLH, and regenerator system for R123, R245ca, and R245fa.

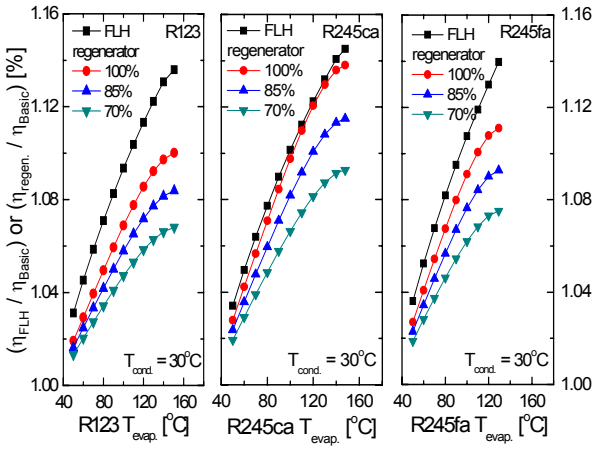


Fig. 10 Efficiency ratio based on basic ORC of FLH and regenerator system for R123, R245ca, and R245fa.

수록 급액가열기 적용이 ORC의 성능향상에 더 크게 기여한다. 세 작동유체에 대해 증발온도 110℃ 이상인 경우 급액가열기의 적용은 기본 ORC의 효율을 10% 이상 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 증발기 온도가 120℃인 조건에서 급액가열기를 이용한 성능향상은 R123, R245ca, R245fa에 대해 각각 11.3%, 12.2%, 13.0%로 동일 증발온도에서 R245fa의 성능향상이 다른 작동유체에 비해 약간 높지만 그 차이는 크지 않았다.

재생기를 적용하는 경우 기본 ORC의 효율을 향상 시킬 수 있지만 급액가열기에 비해 그 값은 작았다. 증발온도가 낮은 경우 재생기의 효율은 기본 ORC의 효율증가에 큰 영향을 미치지 못하며, 증발온도가 높은 경우 재생기 효율에 따라 효율증가율도 두드러지게 변한다. 급액가열기와 다르게 재생기를 이용한 ORC의 효율증가는 작동유체에 따라 크게 달라짐을 알 수 있다. Fig. 10에서 R245ca 적용 기본 ORC는 재생기를 적용하는 경우 다른 작동유체를 적용하는 ORC에 비해 상대적으로 높은 성능향상을 기대할 수 있음을 보여주며, 특히 100% 효율의 이상적인 재생기 성능을 가정한 경우 급수가열기를 적용한 경우와 유사한 성능향상을 달성할 수 있음을 보여준다.

이러한 작동유체 종류에 따른 재생기 효과의 차이는 Fig. 4의 T-h 선도를 통해 설명할 수 있다. 터빈의 출구(4번)에서 펌프 출구의 온도에 해당하는 지점(a지점)의 엔탈피 차이가 재생 가능한 최대 엔탈피의 차를 나타내며 R245ca의 (h_4-h_a) 값이 다른 작동유체보다 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 R245ca의 재생기 적용이 다른 작동유체에 비해 성능향상에 유리함을 알 수 있다. 이러한 특성을 정량적으로 표현하기 위해 Fig. 11이 제시되어 있으며, Fig. 11은 R245ca의 재생 가능한 엔탈피와 증발기에 필요한 에너지의 비율이 다른 작동유체에 비해 크다는 것을 보여준다.

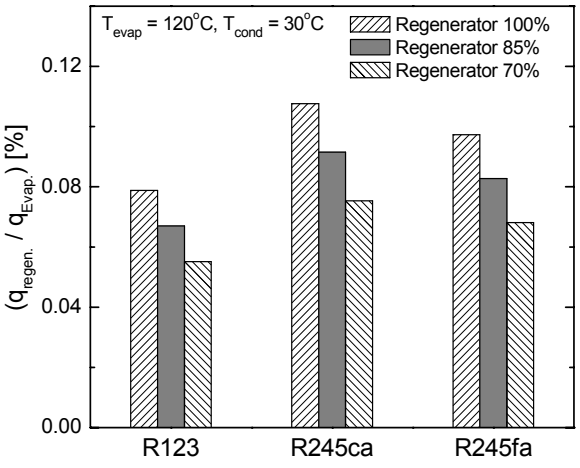


Fig. 11 (qregen./qevap.) for R123, R245ca, and R245fa at the regenerator efficiency of 100, 85, and 70%.

한 가지 더 주목할 점은 Fig. 10에서 증발온도의 증가에 따라 재생기를 통한 성능향상이 증가하다가 그 증가 비율이 감소한다는 점이다. 증가비율의 감소가 시작되는 온도는 R123와 R245ca는 140℃, R245fa는 120℃ 근처이다. Fig. 4에서 각 작동유체의 포화증기 선도를 보면 언급하였던 온도는 온도의 증가에 따라 엔탈피의 증가가 거의 없는 영역 근처의 온도임을 알 수 있다. 이러한 영역에서 온도를 증가시키면 터빈 출구에서의 엔탈피 증가가 없기 때문에 재생 가능한 엔탈피의 증가가 없어 기본 ORC 효율에 비해 추가적인 향상을 갖지 못하게 된다. 이러한 영역보다 높은 온도의 증발조건을 갖는 ORC 작동은 포화증기 상태에서 터빈 내에서 팽창하며 액체-증기 2상 영역을 동반하고 터빈에 손상을 줄 우려가 존재하므로 본 연구에서 고려하지 않았다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서 기본 ORC, 급액가열기 적용 ORC, 재생기 적용 ORC에 대해 이상적인 작동조건에서 열역학적 효율을 비교, 분석하였다. 기본 ORC에서 저온의 열원을 활용하는 경우 작동유체 R113, R123, R245ca, R245fa 순서로 효율이 우수하였다. 급액가열기 적용 ORC의 경우 급액가열기의 압력에 따라 시스템의 효율이 달라지므로 작동 시 증발압력과 응축압력의 조건에 따라 효율을 최대화하는 최적의 압력이 존재함을 확인하였다. 수치적 분석을 통해 R123, R245ca, R245fa에 대해 증발 및 응축압력이 정해진 경우, 효율을 최대화 하는 최적압력을 계산하는 상관식을 제시하였으며 상관식은 0.505%의 평균절대편차를 가졌다. 급액가열기를 적용하는 경우가 재생기를 사용하는 경우에 비해 기본 ORC의 효율을 높이는 효과가 우수하였고, 응축온도 30℃ 조건에서 증발온도가 110℃ 이상인 경우 10% 이상의 성능향상을 기대할 수 있음을 보였다. 재생기의 사용은 작동유체의 종류에 따라 성능향상의 효과가 달라짐을 확인하였으며, 본 연구에서는 R245ca를

적용한 기본 ORC가 재생기 적용 시 다른 작동유체에 비해 더 높은 성능향상을 가질 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. Schuster, A., Karellas, S., Kakaras, E., and Splitethroff, H., 2009, Energetic and economic investigation of organic Rankine cycle applications, Applied Thermal Engineering, Vol. 29, No. 9, pp. 1809-1817.
2. Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., and Fischer, J., 2007, Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles, Energy, Vol. 32, No. 7, pp. 1210-1221.
3. Hettiarachchi, H. D. M., Golubovic, M., Worek, W. M., and Ikegami, Y., 2007, Optimum design criteria for and organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources, Energy, Vol. 32, No. 9, pp. 1698-1706.
4. Mago, P. J., Chamra, L. M., Srinivasan, K., and Somayaji, C., 2008, An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, No. 9, pp. 998-1007.
5. Gang, P., Jing, L., and Jie, J., 2010, Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative organic Rankine cycle, Applied Thermal Engineering, Vol. 30, No. 9, pp. 998-1004.
6. Heberle, F. and Brüggermann, D., 2010, Exergy based fluid selection for a geothermal organic Rankine cycle for combined heat and power generation, Applied Thermal Engineering, Vol. 30, No. 11, pp. 1326-1332.
7. Bombarda, P., Invernizzi, C. M., and Pietra, C., 2010, Heat recovery from Diesel engines : A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles, Applied Thermal Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 212-219.
8. Lemmon, E. W., McLinden, M. O., and Huber, M. L., 2003, REFPROP, ver. 7.1, Physical and Chemical Properties Division, NIST, Gaithersburg, MD, U.S.A.