

두 종류의 다른 작동유체가 ORC 시스템의 성능에 미치는 영향

Performance Analysis of an ORC System for Two Different Working Fluids

장홍순(Hong-Soon Chang)¹, 송영길(Yeong-Kil Song)^{2*}, 한영섭(Young-Sub Han)¹

¹한국산업기술대학교 에너지전기과, ²㈜거나백

¹Korea Polytechnic University depart of Energy & Electrical Engineering

²HNC Co., Ltd.

(Received March 27, 2013; revision received June 14, 2013)

Abstract The organic Rankine Cycle (ORC) uses a kind of refrigerant as a working fluid that evaporates at relatively low temperature, as the Rankine Cycle uses superheated steam as the working fluid. A small scale ORC test bench was installed, and two different working fluids (R245fa and R134a) were injected into the test bench. The test bench was in operation with the two different working fluids under the same conditions. The effects against the system performance from the different working fluids were analysed, and root causes were identified. Other factors reflecting the power generation efficiency were also found. A conclusion was drawn, that R245fa makes the system perform better, than R134a.

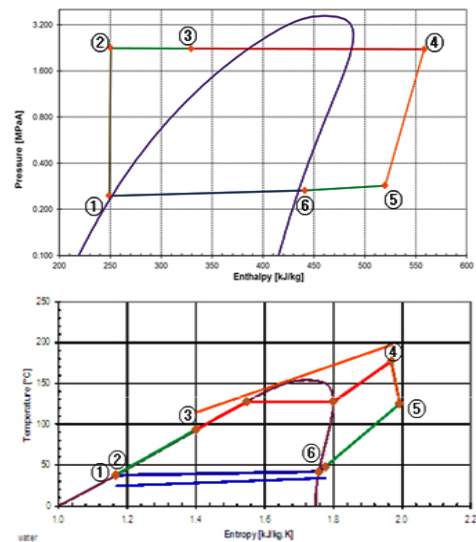
Key words Organic Rankine Cycle(유기랭킨사이클), Working Fluid(작동유체), Permanence(구동), Power Generation (발전기), R245fa(냉매), R134a(냉매)

* Corresponding author, E-mail: yeong.song@hncnet.com

1. 서 론

1.1 연구의 배경

에너지 가격의 지속적 상승과 이산화탄소 배출에 대한 적극적 규제 움직임에 따라 여러 모양의 폐열을 이용하는 2차 발전 시스템들이 시장에 속속 소개되고 있다. 이 중의 하나가 중저온의 열을 이용하여 유기랭킨 사이클(Organic Rankine Cycle : ORC)을 구동하여 발전하는 ORC 발전 시스템이다. ORC 발전 시스템은 일반적으로 '폐열'로 인식되어 대기 중으로 버려지는 중·저온(약 300℃ 이하)의 비교적 낮은 엔탈피를 갖는 열원을 이용하여 전기를 만들어 내는 유기랭킨 사이클을 이루는 발전 시스템이다. 유기랭킨 사이클의 구성을 P-H와 T-S Diagram으로 Fig. 1에 표현하였다. 일반적으로 낮은 온도에서 증발하는 (예 : 공조용 냉매) 작동유체는 증발기를 지나면서 열원으로부터 열에너지를 공급받아 고압의 증기 상태가 되어 팽창기를 통과하면서 팽창기를 회전시킨다. 이때, 팽창기에 연결된 발전기가 회전하므로 전기를 생산하게 된다. 팽창기를 통과한 작동 유체는 적절한 냉각과 가압과정을 거쳐 다시 증발기로 유입되는 밀폐형 유기랭킨 사이클을 구성하게 된다. 시스템의 발전 효율은 증발기에서



- 1~2 : Working fluid pressure process by pump
- 2~3 : Heating process by Regen
- 3~4 : Heating process by Evaporator
- 5~6 : Heat release process by Regen
- 6~1 : Working fluid cooling process by condenser

Fig. 1 Mollier and T-S chart for ORC power generation system).

열는 단위 시간당 에너지 대비 약 25% 이상까지 가능한 것으로 보고되고 있다.

ORC 발전 시스템의 주요 요소 부품으로서 팽창기, 증발기, 복수기, 발전기, 펌프 및 재생기 등이 있다. 폐열을 이용한 2차 발전 시스템의 효율은 이들 주요 부품의 성능과 운전 특성에 따라 크게 좌우된다.

1.2 ORC 발전 시스템의 구성

아래 Fig. 2는 본 연구에서 사용된 소규모 ORC 발전 시스템이다. 이 시스템은 각각 정해진 조건에 따라 주입된 두 종류의 작동유체(R245fa와 R134a)에 의하여 작동되었다. 이때 운전 조건에 따른 발전기 회전수를 측정하여 시스템의 효율을 판단하게 된다. 본 시스템을 구성하고 있는 주요 부품들은 다음과 같다.⁽¹⁾

① 가열조

증발기에 열에너지를 공급하기 위하여 내용적 약 100l 크기의 가열조에 3 kW 정격의 가열기를 고정으로 배치하고, 여기에 신속한 가열을 위하여 추가로 1 kW급의 전기 가열기를 설치하였다. 최대한 단열을 유지하기 위하여 PE계 단열재를 이용하여 가열조를 단열하였다. 가열조에서 가열된 물은 펌프를 통하여 증발기로 들어가 냉매를 가열한 후, 다시 가열조로 유입된다.

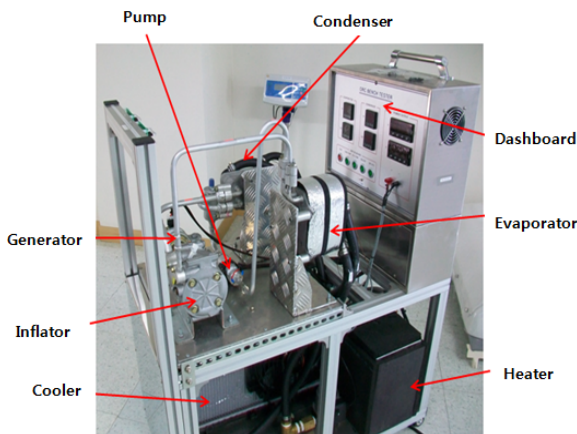


Fig. 2 Mini ORC Power Generation System.

② 증발기

증발기로서는 판형 열교환기가 사용되었다. 100 L×70 W×165 H의 판형 열교환기는 가열조로부터 유입되는 뜨거운 물과 펌프로부터 유입되는 작동유체 (냉매)가 서로 열교환 하는 곳이다. 펌프를 통하여 증발기로 이송된 저온, 고압, 액체 상태의 작동유체는 증발기를 지나면서 고온, 고압, 기체 상태로 변화한다. 열원으로

서의 물 및 작동유체에 대한 증발기 입출구 온도를 각각 측정 후, LMTD(Log Mean-Temperature Difference) 방식을 통해 열 교환량을 구할 수 있다.

③ 팽창기

ORC 발전시스템에서 팽창기는 마치 일반 화력 발전 시스템의 터빈과 같은 역할을 한다. 고압, 기체 상태의 작동유체 열에너지는 팽창기 로터를 회전시키는 운동에너지로 변환되어 사용되고, 저압의 기체 상태로 팽창기를 빠져 나가게 된다. 세계적으로 팽창기를 개발하여 상품화시키는 업체들이 늘어나고 있다. 몇 년 전만 해도 미국의 GE가 중심이 되어 중형(500 kW 급) 팽창기를 개발, 생산하여 왔으나, 최근에 미국의 R&D Dynamics, Air Squared 등이 소형 팽창기(50 kW 이하) 시장에 속속 진입하고 있다. 스팀 터빈과 다르게, ORC 용 터빈의 특징은 비교적 소형으로서 터빈 효율이 터빈 설계에 따라 많이 좌우된다. 요즘 시장에 선보이는 소형 팽창기의 효율은 대략 80%~85% 수준이다.

④ 발전기

팽창기 회전축에 연결된 발전기는 팽창기의 축회전 토크 및 회전수에 따라 발전량이 변하게 된다. 본 연구에서는 자동차 에어컨에 사용되는 24 V용 블로어 모터를 사용하여 발전기 역할을 하도록 하였다. 이 모터에 인가되는 전류가 20 A 이상에서 작동 가능하도록 설계 되었으므로 본 모터를 이용하여 당초 목적했던 100 W 급 발전 시스템을 구성하였다. 실제로 수십 혹은 수백 kW를 생산하는 발전기의 경우 발전되는 전기에 노이즈가 많이 섞여 있는 것이 일반적이므로, 대개 발전기와 정류기 등을 복합하여 사용하는 것이 통상적이다. 또한, 팽창기와 발전기 축에 타코미터(tachometer)를 설치하여 팽창기 회전수를 감지하고 데이터 로거를 통해 자동으로 저장될 수 있도록 하였다.

⑤ 응축기

팽창기를 나온 저압의 작동유체는 응축기를 거치는 과정에서 기체 상태에서 액체 상태로 바뀌게 된다. 응축기에서 열교환되는 열량의 계산도 증발기와 같은 방법으로 계산된다. 실제로 응축기에서의 열 교환량이 증발기에서보다 적으나, 응축기의 LMTD 값이 증발기보다 적기 때문에, 응축기의 크기가 오히려 증발기보다 더 큰 편이다. 본 과제에서 사용된 응축기는 증발기와 같이 판형 열교환기를 사용하였으며, 그 크기는 165 L×100 W×75 H이다.

⑥ 펌프

ORC 발전 시스템에 사용되는 펌프는 저온 저압의 작동유체를 고압으로 올려주는 역할을 한다. R245fa 냉

매의 경우 약 250 kPa의 작동유체 압력을 2,500 kPa로 증압시켜야 한다(Fig. 1의 ① ~ ② 구간). 이를 위하여 시간당 255 LPH의 유량을 이송할 수 있는 Walbro사의 Inline pump GSL392를 펌프로 채택하였다.

⑦ 냉각기

냉각기의 역할은 응축기 내에서 작동유체로부터 얻은 에너지를 방출하기 위한 것이다. 실제 ORC 발전 시스템에서는 수냉식 혹은 공랭식 Cooling Tower가 일반적으로 사용되지만, 본 연구에 사용된 실험용 ORC 발전 시스템의 경우 자동차용 라디에이터와 송풍기를 통하여 응축기에서 나오는 냉각수의 온도를 상온으로 낮추었다. 특히 라디에이터의 경우 최근의 자동차용 고효율 Parallel Flow 열교환기를 채택하여 라디에이터의 두께를 18 mm까지 줄일 수 있었다.

2. 실험적 고찰

2.1 선택된 냉매의 특성

실험용 ORC 발전 시스템에 R-134a를 작동유체로 채용하여 운전할 시 예상되는 사이클은 Fig 3과 같다. 이때 응축기 입수 온도는 30℃ 이하, 증발기 입수 온도는 80℃로 가정하였다. Fig. 3에서 보듯이 작동유체의 응축기 출구 온도가 낮을수록, 또한 증발기 출구 온도가 높을수록 시스템 효율은 증가한다. 그러나 R134a 특성상 임계점의 온도 및 압력이 비교적 낮아 증발기 온도를 높이는 데 한계가 있고, 응축기 온도는 대기온도를 기초로 하므로 R134a를 냉매로 하는 ORC 발전 시스템 작동에는 한계가 있을 것으로 사료된다.⁽²⁾ 이러한 운전 조건에서는 R134a를 작동유체로 사용할 경우, 팽창기에서 얻을 수 있는 동력이 매우 제한적일 수 있다. Fig.

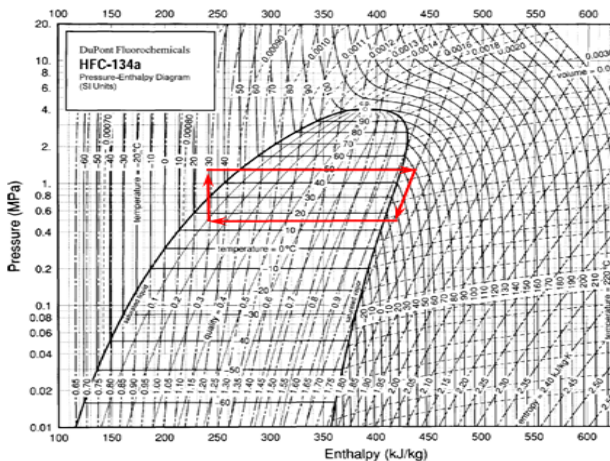


Fig. 3 ORC Cycle for R-134a in Mollier Chart.

3을 기초로 조사한 팽창기 출력 에너지는 약 20 kJ/kg 이 될 것으로 사료된다.

R245fa는 R134a과 비교할 때 열역학적 특성이 서로 유사하나, R245fa가 R134a에 비하여 임계 압력은 대동소이 하지만 임계 온도가 50% 정도 높은 편이다. 또한 대기 상태에서 R134a는 기체 상태로 존재하나 R245fa는 대기온도가 20℃ 이하인 경우 액체 상태로도 존재할 수 있다. 즉 R134a 대비 증발온도가 약간 높다. 따라서 여러 가지 성질이 서로 비슷하나 200℃ 정도의 폐열을 열원으로 이용하여 ORC 발전 시스템을 가동할 경우 냉매를 액화시키기 위하여 R134a용 시스템은 저압측을 약 800 kPa 정도로 높게 유지해야 하는 단점이 있다. 반면, R245fa의 경우, 저압측 압력이 약 200 kPa 정도이면 가능하다. Fig. 4는 R245fa의 압력 대비 엔탈피의 변화량을 보여주는 몰리에 선도(Mollier Chart)이다. 그래프 상에 그려진 자료를 토대로 볼 때, 팽창기를 통해 얻을 수 있는 에너지는 약 20 kJ/kg이다. 단위 질량유량 당 에너지 량이 R134a와 같지만, R245fa 시스템은 R134a 시스템보다 저압측 작동 압력이 낮아도 쉽게 액화시킬 수 있으므로 실용적이다. 질량유량의 변화량에 따라 최종적으로 시스템에서 발생하는 전력량이 다르다. 이론적으로 볼 때 R134a의 경우 R245fa보다 동일 조건에서 밀도가 약 25% 정도 낮으므로, 따라서 질량 유량도 그만큼 적게된다. 이를 다시 표현하면 R245fa를 작동유체로 하는 ORC 시스템이 R134a를 작동유체로 하는 시스템보다 발전 효율이 약 25% 높다는 것이다.⁽³⁾

2.2 실험 결과 및 해석

하나의 소규모 ORC 발전 시스템에 두 개의 서로 다른 작동유체(R134a 및 R245fa)를 각각 사용하여 시스템을 구동하면서 증발기 입수 온도를 40℃~80℃까지

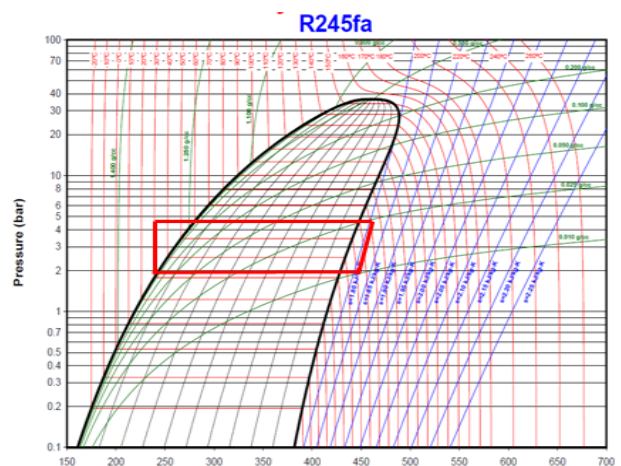


Fig. 4 ORC Cycle for R245fa in Mollier Chart.

10°C 단위로 변경하였고, 작동유체 충전량은 400 g ~ 600 g까지 100 g씩 증가시키며 발전량의 변화를 관찰하였다. 여기에서 시스템의 구성상 발전량을 직접 측정할 수는 없었으나 동일한 부하에서의 발전기의 회전수 변화를 측정함으로써 발전량의 변화를 정성적으로 측정할 수 있었다.

R134a를 작동유체로 사용한 경우 충전량이 400 g 이하에서는 시스템이 전혀 작동하지 않았으나 충전량이 500 g을 넘어서면서 시스템이 작동하기 시작했다(아래 Fig. 5 참조).

그러나 증발기 입수 온도가 증가하여도 팽창기 회전수의 변화는 뚜렷이 관찰되지 않았다. 40°C부터 80°C 구간을 지나면서 회전수의 변화는 약 100 rpm 미만에 그쳤다. 냉매 충전량을 600 g으로 증가시킨 경우에도 (Fig. 6 참조) 비슷한 현상이 반복되었는데, 이는 충전량에 관계없이 시스템 내에서 R134a가 충분히 액화되지 못하고 있음을 보여준다. 그 이유는 응축기의 온도가 압력 대비 습증기 구역이나 포화증기 구역에 있기

때문이다. 따라서 R134a를 이용하여 ORC 시스템을 구동하기 위해서는 시스템 내의 저압측 압력을 약 700 kPa 이상으로 올리거나 응축기 입수 온도를 30°C 이하로 낮추고 크기를 매우 크게 하여 대기 중에서 쉽게 액화될 수 있도록 해야 한다.⁽⁴⁾

R134a를 작동유체로 하는 경우, 냉매를 액화시켜줄 수 있는 정도의 온도(약 10°C 이하) 환경에서 사용하는 것이 바람직하다. R245fa를 이용하여 시스템을 구동한 경우, 각 충전량 별 시스템 발전량의 변화를 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다. 두 그림이 보여주듯이 동일 압력에서 응축 온도(증발 온도)가 R134a보다 높은 R245fa는 주어진 시스템 내의 응축기에서 R134a에 비하여 상대적으로 액화하는데 어려움이 없었던 것으로 보인다. 이는 증발기의 온도를 상승시킴에 따라 발전기 회전수가 증가하는 결과를 보아도 알 수 있다. Fig. 6에서 증발기의 입수온도가 상승할수록 R134a와는 다르게 R245fa로 구동되는 시스템의 발전기 회전수가 상승함을 관찰할 수 있다. 이는 증발기의 입수 온도가 오를수록 액체 상태의 작동유체가 증발기로 유입되어 기화하는 과정을 거치는 동안 더 많은 에너지를 받아 팽창기에서 더 많은 일을 수행하기 때문이다. Fig. 7은 Fig. 5와 같은 조건에서 운전되는 두 종류의 작동유체에 대한 고·저압의 차이를 나타낸 것이다. Fig. 7에서와 같이 R134a의 고·저압 차는 미미함을 알 수 있다. 이는 R134a 작동유체가 응축기에서 충분히 액화하지 못한 습증기 상태로 증발기에 유입되므로 증발기에서 충분히 에너지를 보충 받지 못했기 때문에 고·저압 간 압력차를 만들어 내지 못하고 있음을 설명하고 있다. Fig. 7에서 증발기 입수 온도가 80°C일 때 데이터가 표시되지 않는 이유는 응축기 출구위 저압을 측정하는 압력계의 최대값(FSO = 12kPa)을 초과하여 측정 불가로 기록되었기 때문이다. R245fa의 경우 증발기 입수 온도의 온도가 높을수록 응축기에서 액화된 작동유체가 증발기 내에서

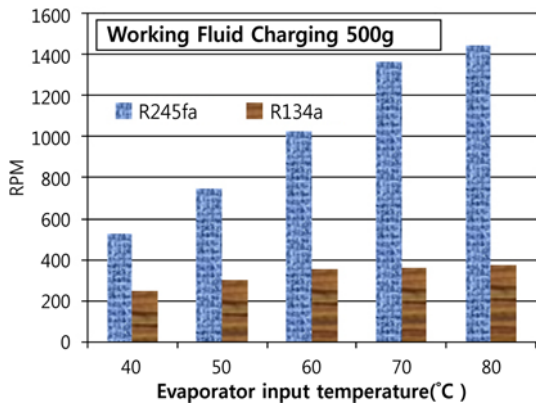


Fig. 5 Power Generation Differences against Evaporator Inlet Temperature(Working Fluid = 500g).

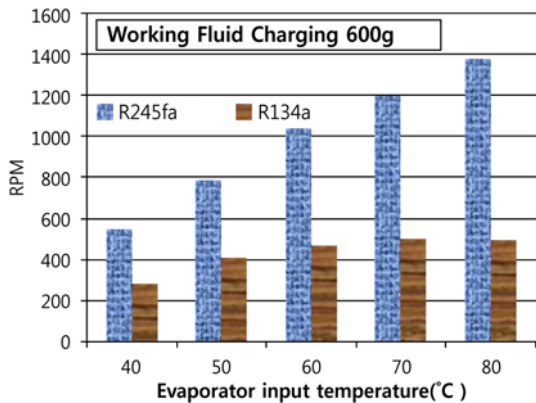


Fig. 6 Power Generation Differences against Evaporator Inlet Temperature(Working Fluid = 600g).

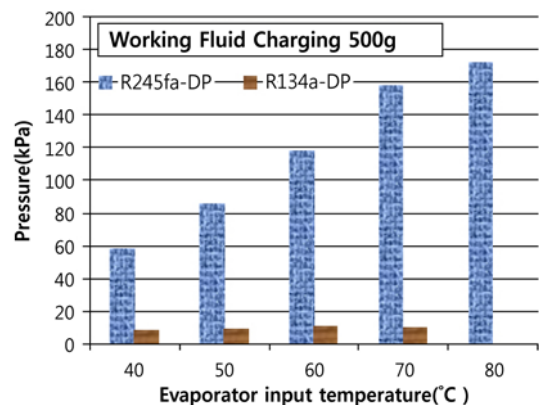


Fig. 7 Pressure Differences against Evaporator Inlet Temperature(Working Fluid = 500g).

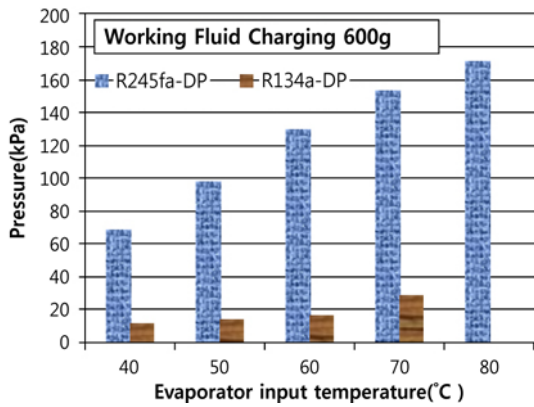


Fig. 8 Pressure Differences against Evaporator Inlet Temperature(Working Fluid = 600 g).

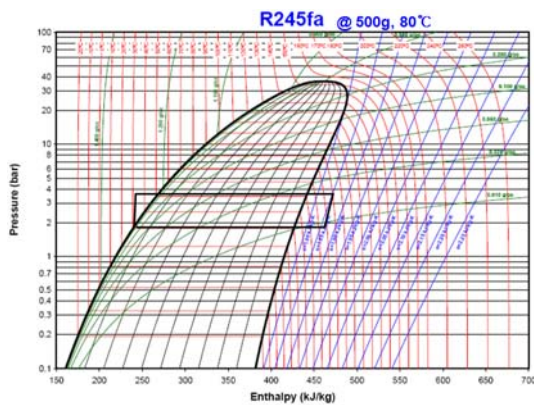


Fig. 9 Operation of ORC Power Generation System Using R245fa as Working Fluid.

열 교환량이 많아지고, 따라서 작동유체가 포화 증기 혹은 과포화 증기 상태로 팽창기로 유입되기 때문으로 보여진다. Fig. 8은 냉매 충전량을 600 g으로 유지한 상태에서 Fig. 7과 같은 시험을 수행한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 8에 나타난 두 냉매의 거동도 대체로 Fig. 7과 같은 유형을 보여주고 있음을 알 수 있다. 또한 여기에서도 80°C에서 R134a의 저압측 측정이 불가하여 표시되지 않았다. Fig. 5, Fig. 6 및 Fig. 7에 사용된 데이터를 중심으로 R245fa P-H Diagram 상에서 시스템 작동 점들을 도식하여 Fig. 8과 같이 나타내었다. Fig. 9는 충전량 500 g의 R245fa 시스템에서 증발기 입수 온도가 80°C일 때의 시스템의 거동을 도식한 것이다. 펌프 및 가열원을 좀 더 크게 해주면 그만큼 고압측 압

력을 높일 수 있고, 따라서 더 큰 발전량을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.⁽⁵⁾ 또한, 응축기를 충분히 크게 설계하여 펌프로 이송되는 작동유체가 액화된 상태임을 검증할 필요가 있다.

3. 결 론

위에서 언급한 내용을 정리하면 아래와 같다.

- 대기 중에서 항상 기체상태로 존재하는 R134a를 ORC용 작동 유체로 사용하기 위해서는 저압이 약 700 kPa 정도로 가압시켜야 실온 (30°C) 상태에서 액화가 가능하다.
- 응축기에서 액화된 작동유체의 열역학적 상태에 따라 시스템 효율이 크게 좌우된다.
- 시스템 내 고압 및 저압 간 압력차의 크기가 클수록 팽창기 발전 효율이 높아진다.
- 증발기 및 응축기 온도차와 압력차 각각이 팽창기 발전 효율에 미치는 영향 분석의 기초 제공.

후 기

본 연구는 2012년도 교육과학기술부의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chang, H. S., Song, Y. K., and Han, Y. S., 2012, Interim Report on Development of Efficiency Assessment Technology for Secondary Power Generation Systems, KPU, pp. 7-23.
2. Buijtenen, J. V., 2011, Design, Developen and Operation of the Tri-O-Gen ORC Power Unit, Tri-O-Gen, Sep. 2011.
3. Park, H. S., Cho, H. C., and Lee, Y. K., 2001, Development of 1MW ORganic Rankine Cycle System, Energy Engg. J(2001), Vol. 10, No. 4, pp. 318-326.
4. Korea Institute of Energy Research, 1991, For the utilization of waste heat recovery Organic Rankine Cycle Development and Application Research(iii), Korea Institute of Energy Research.
5. Vankeirsblick, I., Vanslambrouck, B., Gusev, S., and De Paepe, M., 2011, Organic Rankine Cycle as Efficient Alternative to Steam Cycle for Small Scale Power Generation, HEFAT2011, July 2011.