

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.4.317>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

ASPEN PLUS®를 이용한 태양열 유기랭킨사이클 열병합 발전시스템의 공동주택 적합도 분석

임석연* · 김형근** · 유상석***†

* 동명대학교, ** 대전산업정보학교, *** 충남대학교

Feasibility of a Solar Thermal Organic Rankine Cycle Power Plant for an Apartment Complex with Aspen Plus®

Seokyeon Im*, Hyung-Geun Kim** and Sangseok Yu***†

* Dept. of Automotive Engineering, Tongmyong Univ., ** Daejeon Polytechnic School, *** Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received September 3, 2014 ; Revised December 24, 2014 ; Accepted January 25, 2015)

Key Words: Solar Thermal Hot Water System(태양열 급탕시스템), Organic Rankine Cycle(유기랭킨사이클), Irreversibility(비가역성), Sensitivity Analysis(민감도 분석)

초록: 본 연구에서는 아파트단지에 적용되는 태양열 급탕 시스템의 에너지 활용도를 높이기 위해 유기랭킨사이클을 적용하여 해석적 연구를 수행하였다. 시스템 해석은 Aspen Plus®을 활용하였으며 태양열 집열기는 급탕 온도와 유기랭킨 사이클의 운전 조건을 고려하여 진공관형 집열기를 적용하였다. R134a, R141a, R245fa 등의 냉매를 작동유체로 선정하였으며, 시스템 성능해석을 통하여 R245fa 냉매가 적용 가능성이 가장 높게 나타났다. 비가역성 해석과 민감도 해석을 통해 유기랭킨 사이클 시스템의 효율 및 성능 확보를 위해서는 증발기와 터빈에 대한 기술 개발이 매우 중요하다는 것을 밝혀냈으며, 순수 급탕으로만 활용하는 시스템에 전기 생산 설비를 추가하게 되면 약 50%의 추가적인 경제성이 확보됨을 확인하였다.

Abstract: In this study, a solar thermal system is designed to provide hot water and electricity for improvement of solar thermal energy availability in an apartment complex. The electricity is generated with Organic Rankine Cycle (ORC) by the solar thermal energy. R134a, R141b and R245fa are selected for operating fluid of the solar thermal ORC system. ORC with R245fa shows the best performance based on the variation of pressure. The irreversibility of component showed that the technology advance of the evaporator ensures a performance improvement. The sensitivity study results indicate that the turbine performance is most effective way to improve the performance of ORC system. An economic analysis showed that approximately 50% more income could be achieved by a solar thermal ORC system with a hot water supply.

- 기호설명 -

h : 엔탈피 [kJ/kg]

s : 엔트로피 [kJ/kg·K]

Q : 전달열량 [kW]

W : 한 일 [W]

T : 온도 [°C]

P : 압력 [kPa]

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

$I\sim 6$: 작동유체 상태

H : 열원수

L : 냉각수

r : 작동유체

c : 임계점

b : 끓는점

PP : 핀치점

† Corresponding Author, sangseok@cnu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

T : 터빈
 P : 펌프
 E : 증발기
 C : 응축기
 0 : 정지상태

1. 서론

우리나라에서는 기후 변화에 따른 규제에 대응하기 위해 신·재생에너지원을 주택에 설치할 수 있도록 다양한 정부 지원사업을 진행 중에 있다. 그로부터 태양열 활용시스템의 주택 설치에 대한 관심이 높아지고 있는 상황이다. 우리나라의 주거용 건축물 에너지 소비 구성을 살펴보면 80%가 난방, 급탕 에너지로 집중되고 있고, 공동주택이 전체 주거용 건축물에서 차지하는 비율이 50% 이상이기 때문에 신·재생에너지를 적용할 수 있는 시장 규모는 충분하다고 판단된다.

유기랭킨사이클(ORC, Organic Rankine Cycle)은 작동유체로 유기혼합물을 사용하여 수증기 발생에 적합하지 않는 중저온(70~400 ℃)의 열원을 활용하는 발전방식으로서, 현재 다양한 산업에서 폐열 회수를 위해 적용되고 있다.⁽¹⁾ 유기랭킨사이클(ORC) 시스템을 공동주택에 적용하면 저온 폐열을 회수하여 전력 생산, 압축기 등의 구동 동력원으로 활용 가능하다. 또한, 다양한 작동 유체의 적용이 가능함에 따라 비교적 광범위한 온도 열낙차 범위에서 운전이 가능하기 때문에 폐열 활용의 제한이 적으며, 저온열원을 사용하므로 저압 저온 운전이 가능해 신뢰성이 높고, 유지관리 비용이 낮은 장점이 있다.

유기랭킨사이클 시스템을 이용한 폐열회수 연구는 1970년대의 에너지 위기 이후 계속적으로 진행되어 실용화단계에 접어들고 있다. Saleh 등⁽²⁾과 Hung 등⁽³⁾은 여러 작동유체에 대한 다양한 유기랭킨사이클의 성능을 비교하였으며, Tchanche 등⁽⁴⁾은 태양열을 이용한 유기랭킨사이클의 작동유체에 관한 연구를 하였고, Mago 등⁽⁵⁾은 건 유체를 이용한 유기랭킨사이클의 기본 시스템과 FWH(Feed Water Heater)를 이용한 시스템에 대한 비교 연구를 하였다. Hung⁽⁶⁾은 작동유체에 따른 시스템의 비가역성 해석을 하였다.

국내에서도 이 등⁽⁷⁾은 유기랭킨사이클의 이용기술을 소개하였고, 조 등⁽⁸⁾은 작동유체 HCFC-123를 이용한 1MW급 유기랭킨사이클 시스템을 개발하여 포항제철소의 배열가스에 적용하여 그 응용가능성

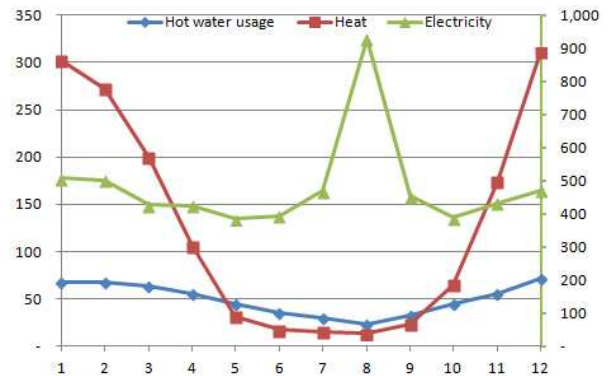


Fig. 1 Annual energy consumption of a single unit apartment complex⁽¹²⁾

을 확인하였다. 또한, 김 등⁽⁹⁾은 다양한 작동유체를 이용한 유기랭킨사이클의 열역학적 성능에 관해 연구하였고, 오 등⁽¹⁰⁾은 선박에서 배출되는 배기가스의 폐열을 열원으로 하는 유기랭킨사이클 발전 시스템에 대한 연구를 하였으며, 백 등⁽¹¹⁾은 지열 발전을 위해 R-245fa를 이용한 랭킨사이클의 성능을 해석하였다.

현재 국내에서는 공동주택에 태양열 급탕시스템을 적용중이지만, Fig. 1에 나타난 것처럼 계절적인 영향으로 인하여 온수사용에 의한 태양열 에너지는 효과적으로 활용되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 하절기에 급증하는 전력 수요를 태양열 급탕 시스템으로부터 얻을 수 있는 방법과 급탕 설비와 발전 설비를 함께 작동시켜 설비가 연간 가동되는 조건에서 경제성을 확보할 수 있는 방법을 찾고자 하였다. 이러한 시스템 설계를 위해 우선 다양한 작동유체를 이용하여 태양열 급탕 시스템에 적용할 유기랭킨사이클의 최적 조건을 선정하고, 다양한 집열 조건에서 시스템의 성능을 분석하였다. 시뮬레이션은 공정모사 프로그램인 Aspen plus[®]를 이용하였으며 에너지 수요 대상이 되는 공동 주택 아파트 1개 동은 전용면적 84 m²의 판상형 아파트로 6개 라인을 갖는 43세대수를 대상으로 하였다.

2. 태양열 유기랭킨사이클 시스템 모델

2.1 태양열 급탕 유기랭킨사이클 작동 유체

태양열 유기랭킨사이클 시스템은 기존의 태양열 시스템에서 사용하는 급탕과 난방기능을 유지하면서 태양열을 열원으로 유기랭킨 사이클을 작동시켜 발전하는 시스템을 말한다.

태양열 급탕 시스템은 사용되는 열원의 온도가

Table 1 Properties of the working fluids for ORC

Substance	T_c	P_c	T_b	Conditions
R134a	106.06 °C	4.0593 MPa	26.07 °C	Isentropic
R141b	204.40 °C	4.2120 MPa	32.05 °C	Isentropic
R245fa	154.10 °C	3.6400 MPa	14.90 °C	Dry

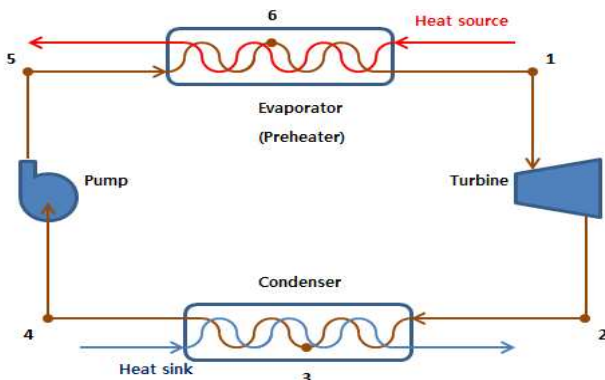


Fig. 2 Schematic of the solar thermal organic Rankine cycle system with hot water supply

낮기 때문에 유기랭킨사이클의 통합을 위해서는 설계 압력, 체적 등을 고려하여 작동유체를 선택하는 것이 필요하다. 작동유체의 종류로는 온도에 대한 포화증기의 엔탈피 변화율이 0보다 작은 습유체, 거의 수직인 등엔트로피 유체 및 0보다 큰 건유체가 있으며, 저온 랭킨 사이클에서는 주로 등엔트로피 포화증기 곡선을 갖는 작동유체를 사용한다.⁽¹³⁾

본 연구에 사용된 작동유체는 R134a, R141b 및 R245fa이며, Table 1에 작동유체의 물성치를 각각 나타내었다. 사용된 작동유체들은 등엔트로피 유체 또는 근접 유체로서 터빈 출구에서 응축되는 액적에 대한 피해가 없기 때문에 과열증기 상태로 터빈에 공급할 필요가 없는 장점이 있다.

2.2 태양열 집열부

일반적으로 상용 태양열 급탕시스템은 온수 온도가 55~60 °C에 맞추어 설계된다. 그러나 태양열 유기랭킨사이클 시스템에서는 집열부에서 가열된 급탕수가 1차적으로 유기랭킨사이클의 증발기로 열교환을 한 후 수용가로 공급되기 때문에 증발기 출구단 온도가 최소한 55 °C 이상이 되어야 한다. 따라서 기존의 집열기는 사용할 수 없

고 대신 100 °C 이상의 활용온도를 가지는 태양열 집열기가 필요하다. 이러한 조건은 평판형 집열기로는 만족시킬 수 없기 때문에, 본 연구에서는 진공관형 집열기를 해석 대상으로 하였다. 또한, 유통되는 진공관형 집열기의 1일 집열량은 최소 9.2 MJ/m²에서 최대 14.3 MJ/m²로 큰 차이가 있고, 집열량은 일사량과 일조시간에 따라 차이가 많기 때문에 일사량, 일조시간, 열효율을 이용하여 집열량을 계산하여 적용하였다.⁽¹⁴⁾ 투과면적 기준으로 최대 집열 효율도 65.1%~83.4%로 제품별 성능 차이가 많기 때문에 집열기의 집열 효율은 평균값인 72.7%로 하였고, 일평균 집열량과 일조시간은 기상청에서 전천일사량을 관측하고 있는 22개 지점의 평균값으로 하였다.⁽¹⁵⁾

태양열 집열기를 통해 유기랭킨사이클을 적용하기 위한 집열기 설치위치는 공용면적인 옥탑에 설치하는 것으로 제한하였으며, 이 경우 설치가능면적을 비율로 계산하면 판상형 아파트의 경우 최대 50%, 타워형 아파트의 경우는 최대 38%가 되기 때문에,⁽¹⁶⁾ 본 연구에서는 전용면적 84 m²의 판상형 6라인의 공동주택으로 가정하여 설치면적을 347 m²로 계산하도록 하였다.

2.3 사이클 해석

Fig. 2에 나타난 것처럼, 태양열 유기랭킨사이클 시스템은 증발기, 터빈, 응축기 및 펌프로 구성되었으며, 시스템 해석을 위해서 다음과 같은 가정과 설계조건을 적용하였다.

- 1) 시스템은 정상상태로 작동되며, 터빈과 펌프의 등엔트로피 효율은 각각 70%와 80%이고, 기계 효율은 98% 이다.
- 2) 터빈 입구에서의 작동유체는 포화증기 상태이고, 펌프 입구에서는 포화액체 상태이다.
- 4) 열교환기에서 고온측과 저온측 최소 온도 차이는 핀치온도차다.
- 5) 증발기와 응축기 내부에서의 압력 강하와 배관 손실은 무시한다.
- 6) 증발기의 열원 출구온도는 55~60 °C로 배출되어야 한다.
- 7) 응축기로는 20 °C의 냉수가 공급된다.

또한, 재생사이클은 기본 유기랭킨사이클에 비해 효율은 높지만 열원 온도가 100 °C로 낮으며, 경제성 확보가 어려워 적용하지 않았다.⁽¹⁷⁾

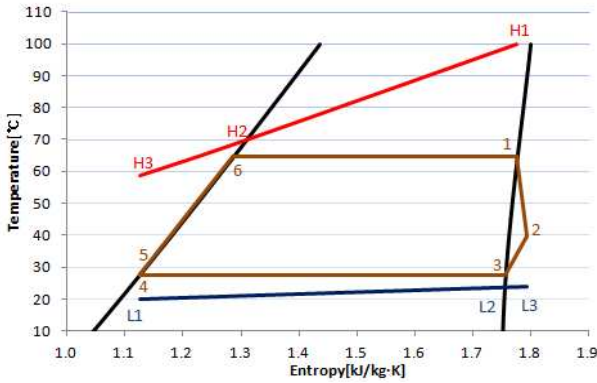


Fig. 3 T-s Diagram of solar thermal organic Rankine cycle (Operating fluid: R245fa)

Fig. 3에는 구성 모델의 열역학적 해석을 위한 T-s 선도를 나타내었다. 사이클은 상태 1부터 6까지의 과정을 거쳐 작동되며 H1부터 H3는 집열판으로부터의 공급된 고온 열원의 온도 변화이고, L1부터 L3는 응축기로 공급되는 냉각수 온도 변화를 나타낸 것이다.

열교환기의 열원수를 통해 전달되는 열량 (Q_H)는 다음과 같이 계산하였다.

$$Q_H = \dot{m}_H \times c_{p,H} \times (T_{H1} - T_{H3}) \quad (1)$$

시스템 효율과 순 일(Net work)의 최적 조건을 확인하기 위하여 열원수의 입구 온도는 100 °C, 태양열 집열판을 순환하는 열매의 질량유량은 1kg/s로 가정하였다. 작동유체의 질량유량은 에너지 평행방정식을 이용하였고, 열교환기에서 열원수가 온도 T_{H1} 에서 T_{H2} 로 변화되는 동안 전달열량 Q_{H12} 는 작동유체 상태 6에서 1로 변화되는 동안 얻는 열량과 동일함을 이용하여 계산하였다.

$$Q_{H12} = \dot{m}_r \times (h_1 - h_6) \quad (2)$$

상태 1과 6에서의 엔탈피 h_1 , h_6 는 주어진 터빈 입구 압력에 의해 결정되며, 열원수 상태 H2에서의 온도 T_{H2} 는 핀치점 온도차 T_{PP} 를 이용해 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$T_{H2} = T_6 + T_{PP} \quad (3)$$

일반적으로 열교환기에서 열원의 질량유량과 입·출구의 온도가 정해지면 열원의 엔탈피차이에 의해 전달열량을 계산할 수 있다. 그러나 열원의 출구온도가 일정하지 않은 경우에는 열교환 되는 두 유체 사이의 최소 온도 차인 핀치점 온도차가 제한 값으로 주어지게 된다. 핀치점 온도차가 작을수록 전달

되는 열량은 커지나 열교환기의 면적이 늘어나야 한다. 본 연구에서는 열원수의 질량유량을 고정하고, 터빈입구 압력에 따라 열원수의 출구 온도가 변화되므로 출구 온도를 정할 수 없다. 따라서 이 경우에는 최적 조건을 구하기 위하여 핀치점 온도차를 제한 값으로 설정하였다.

열교환기에서 냉각수가 상태 L1에서 L3로 변화되는 동안 전달열량 Q_L 은 작동유체 상태 2에서 4로 변화되는 동안 얻는 열량과 동일하기 때문에 냉각수와 열원수의 전달열량 Q_L 도 에너지 평행방정식에 의해 구할 수 있다. 따라서 작동유체 상태 2와 4에서의 엔탈피를 h_2 , h_4 , 냉각수의 상태 L1, L3의 온도를 T_{L1} , T_{L3} 이라고 하면, 전달열량 Q_L 은 식 (4)와 같다.

$$Q_L = \dot{m}_L \times c_{p,L} \times (T_{L1} - T_{L3}) \quad (4)$$

이때 방열을 위한 냉각수의 질량유량은 열원수의 질량유량의 10배로 가정하였고, 터빈과 펌프의 동력은 식 (5)와 식 (6)을 이용하였다.

$$W_T = \dot{m}_r \times \eta_{m,T} \times (h_2 - h_1) \quad (5)$$

$$W_P = \dot{m}_r \times (h_5 - h_4) \quad (6)$$

그러므로 사이클의 열효율은 식 (7)과 같다.

$$\eta_{th} = \frac{W_T - W_P}{Q_H} \quad (7)$$

또한, 각 과정에서의 비가역성은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

증발과정(5→1) :

$$\dot{I}_E = T_0 \times \dot{m}_r \times \left[(s_1 - s_5) - \frac{(h_1 - h_5)}{T_H} \right] \quad (8)$$

팽창과정(1→2) :

$$\dot{I}_T = T_0 \cdot \dot{m}_r \cdot (s_2 - s_1) \quad (9)$$

응축과정(2→4) :

$$\dot{I}_C = T_0 \times \dot{m}_r \times \left[(s_4 - s_2) - \frac{(h_4 - h_2)}{T_L} \right] \quad (10)$$

압축과정(4→5) :

$$\dot{I}_P = T_0 \cdot \dot{m}_r \cdot (s_5 - s_4) \quad (11)$$

이상의 과정에 대한 해석을 위해 본 연구에서는 실제 공정해석에 많이 사용되고 있는 Aspen Plus®를 통하여 시뮬레이션 하였으며, 시스템 구

성은 Fig. 4에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 터빈입구 압력에 따른 시스템 특성

각 작동 유체의 작동 압력에 따른 특성을 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 터빈입구 압력에 따른 시스템 효율을 확인하였다. 열원수 입구 온도 (T_{HI})와 냉각수 입구 온도(T_{LI})는 각각 100 °C와 20 °C로 고정하고, 증발기와 응축기의 작동 허용 온도 범위에서 시스템의 효율 변화를 살펴보면 R134a가 가장 넓은 압력 범위에서 작동이 가능한 것으로 나타났다.

R141b와 R245fa는 R134a보다 효율은 우수하지만, 상대적으로 운전 압력의 자유도는 낮게 나타났다. 운전 가능 영역은 R134a가 0.8 MPa부터 3.6 MPa, R141b는 0.1 MPa에서 0.6 MPa, 그리고 R245fa는 0.2 MPa에서 1.1 MPa였으며, 최대 효율은 R245fa를 작동유체로 한 경우로 10.38%의 효율을 나타냈다. 또한, 각 작동유체의 최대 열효율이 나타나는 조건에서 증발온도와 응축온도를 살펴보면, R134a는 95.1 °C와 24.2 °C, R141b는 94.6 °C와 24.2 °C, R245fa는 93.8 °C와 24.3 °C로 시스템 구현 가능성은 모두 만족하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6은 터빈 열원과 냉각수 온도를 유지한 상태에서 각 작동유체의 터빈입구 압력에 따른 시스템 비가역성의 변화를 나타낸 것이다. 시스템 해석에서는 터빈입구 압력의 증가가 포화 온도의 상승을 수반하기 때문에 작동유체의 비가역성은 터빈입구 압력이 증가할수록 감소되었고, 작동유체의 증발온도와 열원의 온도 차이가 작을 경우 낮은 비가역성을 나타내었다. R134a는 터빈입구

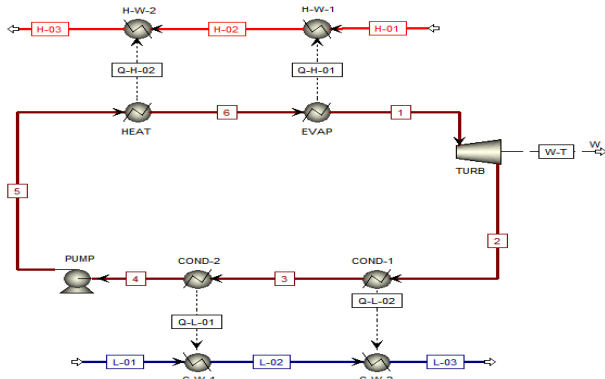


Fig. 4 Schematic diagram of solar thermal organic Rankine cycle system under Aspen plus®

압력이 0.8 MPa에서 3.6 MPa로 증가함에 따라 비가역성은 58.01 kW에서 1.28 kW로, R141b는 터빈입구 압력이 0.1 MPa에서 0.6 MPa로 증가함에 따라 비가역성은 57.42 kW에서 0.82 kW로, R245fa는 터빈입구 압력이 0.2 MPa에서 1.1 MPa로 증가함에 따라 비가역성은 55.71 kW에서 1.68 kW로 감소하였다. 작동유체에 따라 비가역성이 변화되어 시스템 효율에 영향을 주는 특성이 Fig. 6에 잘 나타남을 알 수 있었다.

시스템의 비가역성을 구성요소에 따라 분석해보면, 어떤 구성요소의 개선이 시스템의 효율 상승에 가장 효과적인지 알 수 있다. 작동유체로 R245fa를 적용하고, 터빈 입구 압력을 변화시켜가면서 구성품의 비가역성의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 시스템의 터빈입구 압력이 0.2 MPa의 경우 증발기의 비가역성은 45.86 kW로 전체 비가역성 55.71 kW 중 82.32%로 가장 큰 부분을 차지하고 있으며, 펌프의 비가역성은 0.005 kW로 전체 비가역성의 0.01%로 아주 작은 부분을 차지

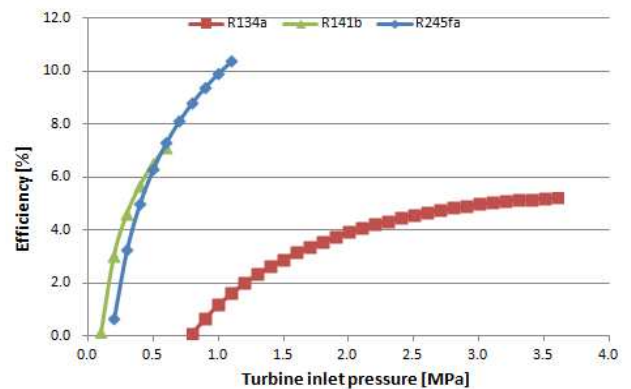


Fig. 5 Comparison of thermal efficiency of solar thermal ORC system over various operating fluids ($T_{LI}=20$ °C, $T_{HI}=100$ °C)

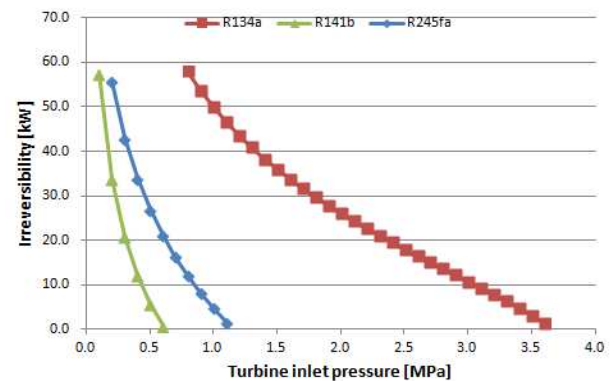


Fig. 6 Turbine irreversibility in terms of turbine inlet pressure ($T_{LI}=20$ °C, $T_{HI}=100$ °C)

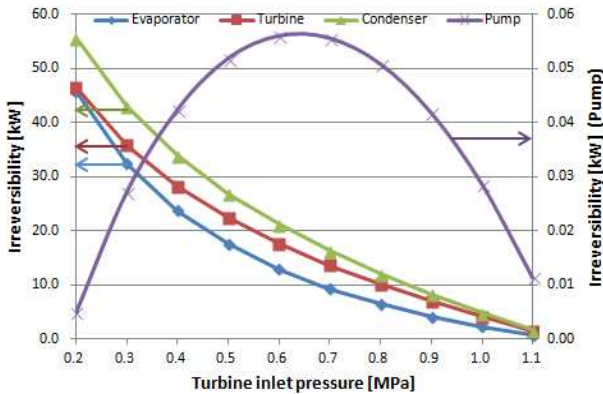


Fig. 7 Irreversibilities of ORC components in terms of turbine inlet pressure (Operating fluid: R245fa, $T_{HI}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{LI}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

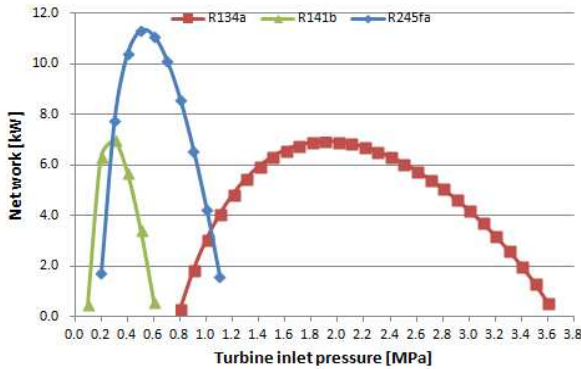


Fig. 8 Comparison of Net work change over various operating fluids ($T_L=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_H=100\text{ }^{\circ}\text{C}$)

함을 알 수 있었다. 따라서 증발기를 성능 개선시키는 것이 전체 시스템의 성능 향상에 매우 중요하다는 것을 알 수 있었다.

시스템으로 전달되는 열량이 일정할 경우, 터빈입구 압력 증가에 따라 열효율은 증가하나, 동일 열량을 만족하는 포화 온도가 계속 증가하기 때문에 작동유체의 질량유량이 감소하게 된다. 그러므로 작동 유체에 따른 순일 곡선은 최대점을 갖는 2차 함수의 형태로 도식될 수 있다.

유기랭킨사이클에서 터빈 입구 압력 변화에 따른 순 일은 Fig. 8에 나타내었다. 각 작동유체의 최대 순 일을 살펴보면, R134a는 터빈입구 압력 1.9 MPa에서 6.9 kW, R141b는 터빈입구 압력 0.3 MPa에서 7.0 kW, R245fa는 터빈입구 압력 0.5 MPa에서 11.33 kW로 나타났으며, 이로부터 R245fa를 작동유체로 하였을 경우에 가장 큰 순 일을 얻을 수 있었다.

3.2 경제성 분석

Fig. 9는 전용면적 84 m²의 판상형 6라인 43세대

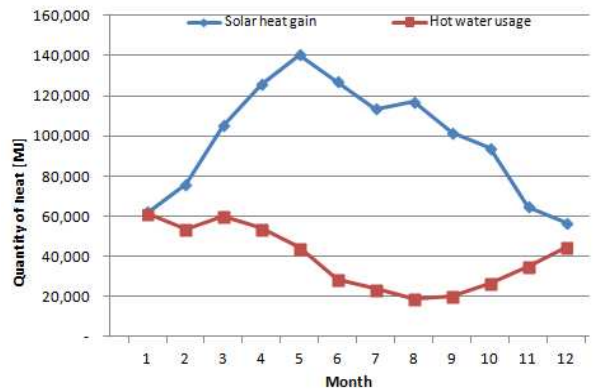


Fig. 9 Monthly variations of absorbed solar thermal energy and hot water usage in apartment complex

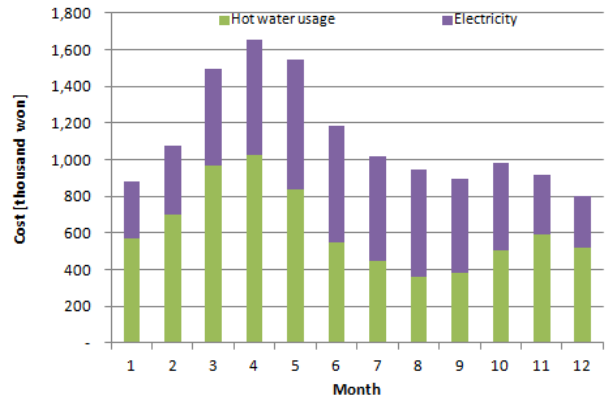


Fig. 10 Economic merits by monthly energy production (Operating fluid: R245fa, $T_{HI}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{LI}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

공동주택 옥탑에 태양열 집열판 347 m²를 설치한 경우, 월별 집열량과 급탕부하를 보여주고 있다.⁽¹⁸⁾ 급탕부하는 요구량이 연간 전체 집열량의 약 40%의 정도이나, 연간 집열량의 절반 이상이 사용되지 못함을 그래프를 통해 알 수 있었다.

작동유체를 R245fa로 하는 유기랭킨사이클을 태양열 급탕 시스템에 적용한 경우, 시스템의 경제성을 Fig. 10에 나타내었다. 터빈 입구 압력은 R245fa의 최대 출력이 나오는 압력을 적용하였고, 태양열이 집열되는 동안은 유기랭킨사이클도 연속 운전을 한다고 가정하여 월별 전력생산량과 온수 생산량을 금액으로 환산하였다. 전력생산량은 5월에 최대 1,321 kWh를 생산하였고, 12월에 최소 534 kWh를 생산하였으며, 연간 총 11,147 kWh를 생산할 수 있었다. 집열량과 급탕부하는 지역난방공사의 난방용(주택) 사용요금인 79.28원/Mcal를 적용하였으며, 생산전력은 발전차액 지원제도에 의한 금액(태양광 기준)인 532.97원/kWh를 적용하였다. 태양열 시스템을 급탕부하용으로만

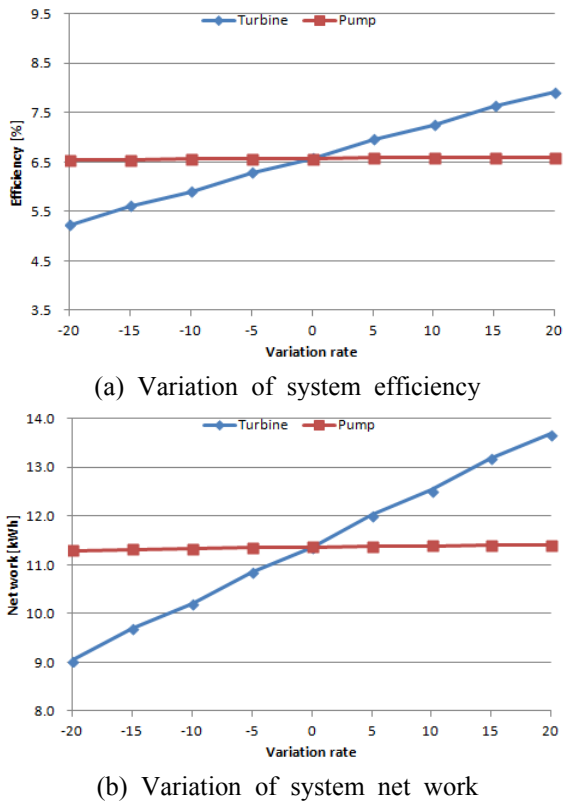


Fig. 11 Performance sensitivity of ORC system over change of turbine and pump performance (Operating fluid: R245fa, $T_{HI}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{LI}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

적용할 경우, 연간 약 893만원의 효과를 얻을 수 있어 세대당 월간 17,306원의 절감 효과가 있는 반면, 유기랭킨 시스템을 적용할 경우 전력생산에서 연간 약 594만원과 급탕에서 연간 약 745만원의 효과를 보였다. 이는 급탕만으로 얻을 수 있는 경제적 효과보다 연간 약 447만원이 증가한 수치로서, 환산해보면 세대당 월간 25,950원의 이득을 얻을 수 있는 것으로 계산 되었다.

현재, 태양열 시스템과 유기랭킨사이클 및 작동유체로 선정된 R245fa의 비용이 고가이긴 하나, 태양열 시스템 설치비용의 50%를 정부에서 지원을 하고 있으며, 고온을 얻을 수 있는 집열기의 적용 및 유기랭킨사이클 시스템의 대량생산을 통한 가격 인하가 이루어질 경우 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 민감도 분석

비가역성 해석을 통한 시스템의 개발에 있어 가장 중요한 작동유체의 선정과 각 구성품의 선정에 따른 시스템 효율의 영향성을 확인하기 위

해서 민감도 분석을 수행하였다. 작동유체를 R245fa로 하고, 순 일(Net work)이 최대값을 나타내는 터빈입구 압력 0.525 MPa, 응축기 압력 0.163 MPa, 증발온도 64.50 $^{\circ}\text{C}$ 및 응축온도 27.63 $^{\circ}\text{C}$ 에서 터빈 효율과 펌프 효율에 대한 민감도를 Fig. 11에 나타내었다. 펌프의 경우 기준점인 등엔트로피 효율 70% 대비 -20%부터 20%까지 변화시키면 시스템 효율은 0.06% 증가되고, 순 일(Net work)은 0.12 kW 증가되었으나, 터빈의 경우 기준 효율 80% 대비 동일한 변화에 대해 시스템 전체의 효율은 2.69% 증가되고, 순 일(Net work)도 4.65 kW 증가함으로 보였다.

시뮬레이션 분석 결과, 유기랭킨사이클을 적용한 태양열 급탕 설비 발전시스템에 있어서 증발기와 터빈이 시스템 효율에 큰 영향을 미치는 가장 중요한 인자임을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 공동주택의 태양열 급탕 시스템에 유기랭킨사이클의 적용 가능성을 확인하기 위하여 유기 유체인 R134a, R141b, R245fa를 작동 유체로 한 유기랭킨사이클을 시뮬레이션 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 주어진 열원수와 냉각수 온도 조건에서 R245fa가 가장 우수한 효율과, 출력을 보여주었으며 운전 범위도 유지보수에 용이한 저압 조건을 달성할 수 있었다.

(2) 태양열 열원을 고정한 경우에 유기랭킨 사이클을 통한 발전량은 최대점을 갖는 포물선 형태이며, 작동유체 중 R245fa가 3개 작동 유체 중 최대 출력이 가장 높았다.

(3) 전용면적 85 m^2 , 6라인의 판상형 공동주택 옥탑에 진공관형 집열기만을 설치한 경우, 세대당 월간 에너지 절감액은 17,306원지만, 유기랭킨 사이클을 이용해 추가 전력을 생산한 경우에는 세대당 25950원까지 절감액을 늘릴 수 있다.

(4) 시스템 비가역성은 증발기가 가장 큰 비중을 차지하고, 펌프가 가장 작은 비중을 차지하며, 민감도 해석에서는 시스템의 효율과 출력에 터빈이 가장 큰 보였다.

후기

본 연구는 한국연구재단의 지역혁신 인력양성사업(201206A0106312010100)과 일반연구자 지원

사업(NRF-2014R1A1A2053692)의 지원을 받아 수행된 것임.

참고문헌 (References)

- (1) Kang, H., 2009, "Organic Rankine Cycle Power Propulsion," *Korean Journal of mechanical Engineering*, Vol. 49, No. 9, pp. 47~51.
- (2) Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M. and Fischer, J., 2007, "Working Fluids for Low-temperature Organic Rankine Cycles," *Energy*, Vol. 32, pp. 1210~1221.
- (3) Hung, T. C., Shai, T. Y. and Wang, S. K., 1997, "A Review of Organic Rankine Cycles(ORCs) for the Recovery of Low-grade Waste Heat," *Energy*, Vol. 22, No. 7, pp. 661~667.
- (4) Tchanche, B. F., Papadakis, G., Lambrinos, G. and Frangoudakis, A., 2009, "Fluid Selection for a Low-temperature Solar Organic Rankine Cycle," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 2468~2476.
- (5) 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, pp. 98~107
- (6) Hung, T. C., 2001, "Waste Heat Recovery of Organic Rankine Cycle Using Dry Fluids," *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, pp. 539~553.
- (7) Lee, Y. S. and Lee, W. Y., 1989, "Mid and Low Temperature Power Recovery System with Organic Rankine Cycle System," *KSAREK*, Vol. 18, No. 1, pp. 29~35.
- (8) Cho, H. C., Park, H. S. and Lee, Y. K., 2001, "Development of 1 MW Organic Rankine Cycle System for Industrial Waste Heat Recovery," *Journal of The Korea Society for Energy Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 318~326.
- (9) Kim, K. H., 2011, "Study of Working Fluid on Thermodynamics Performance of Organic Rankine Cycle(ORC)," *Transaction of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 2, pp. 223~231.
- (10) Oh, C. and Song, Y. U., 2012, "A Study on the Ship's ORC Power System Using Seawater Temperature Difference," *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 36, No. 5, pp. 349~355.
- (11) Baek, Y. J., Kim, M. S., Chang, K. C., Yoon, H. K., Lee, Y. S. and Nah, H. S., 2009, "Analysis of HFC-245fa Organic Rankine Cycle for Geothermal Power Generation," *Transaction of the Korea Society of geothermal energy engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 1~6.
- (12) Apartment management info system, <http://www.k-apt.go.kr>
- (13) Quoilin, S., 2007, "Experimental Study and Modeling of a Low Temperature Rankine Cycle for Small Scale Cogeneration," *Ph.D. dissertation, University of Liege*.
- (14) <http://www.energy.or.kr>
- (15) <http://www.kma.go.kr>
- (16) Kim, M. Y., Choi, B. D., Kim, H. G. and Park, J. C., 2012, "A Study on the Effective Installation to the Apartment through Solar Collector Performance Test," *Solar energy*, Vol. 32, No. 1.
- (17) Hong, E. K., Kim, J. M. and Park, C. Y., 2011, "A Thermodynamic Efficiency Analysis of Basic and Regenerative Organic Rankine Cycles," *Proceeding of KSAREK*, pp. 1204~1207.
- (18) Park, J. S., 2008, "A Study on the Optimum Supply Scheme of Solar Energy System for Apartment Complex," *Hanbat National University*.