

태양열 집열기 모델링을 활용한 발전용 R134a 랭킨사이클의 성능해석

Performance Analysis of R-134a Rankine Cycle to Apply for a Solar Power Generation System Using Solar Collector Modeling

정진환* · 강 변* · 동역걸* · 조홍현**†

Jinhwan Joung*, Byun Kang*, Tong Yijie*, Honghyun Cho**†

(Submit date : 2014. 4. 22., Judgment date : 2014. 4. 22., Publication decide date: 2014. 6. 23.)

Abstract : As the environmental regulations is more strengthened, the study of the renewable energy system and waste heat for electricity production is being accelerated. In this study, the performance and power generation rate of solar power generation by using R134a Rankine cycle was analyzed with solar radiation and mass flow rate of R134a. As a result, the maximum and minimum collected heat of solar collector was 20.4 kW and 13.6 kW at October and December, respectively. Besides, the highest generator power was generated at October and it was 0.91 kW/day, while the lowest generator power is occurred at December and it was about 0.85 kW/day.

Key Words : Organic Rankine Cycle(유기랭킨사이클), Solar Collector(태양열 집열기), Expander(팽창기), R134a

**† 조홍현(교신저자) : 조선대학교 기계공학과
E-mail : hhcho@chosun.ac.kr
Tel.: +82-62-230-7050; fax: +82-62-230-7055,
*정진환 : 조선대학교 대학원 기계공학과
*강 변 : 조선대학교 대학원 기계공학과
*동역걸 : 조선대학교 대학원 기계공학과

**† Honghyun Cho(corresponding author) : Department of
Mechanical Engineering, Chosun University
E-mail : hhcho@chosun.ac.kr
Tel.: +82-62-230-7050; fax: +82-62-230-7055,
*Jinhwan Joung : Graduate School of Chosun University,
Chosun University
*Byun Kang : Graduate School of Chosun University, Chosun
University
*Tong Yijie : Graduate School of Chosun University, Chosun
University

기 호 설 명

- A : 면적 (m²)
- C_p : 열용량 (J/kg · k)
- D : 직경 (m)
- F' : 태양열 집열기 효율계수
- G : 일사량 (W/m²)
- k : 전도율 (W/Km)
- \dot{m} : 질량유량 (kg/s)
- Nu : Nusselt 계수
- Q : 열량 (W)
- R : 열저항 (kW)
- T : 온도 (°C)
- t : 두께 (m)
- U : 총괄열전달계수(W/m² · °C)
- SC : 태양열집열기

그리스 문자

- η : 효율
- ϵ : 방사율
- τ : 유효 투과율
- α : 유효 흡수율

하첨자

- a : 외기온도
- con : 응축기
- e : 증발기
- hp : 히트 파이프
- I : 입구, 내부
- o : 출구
- u : 유용도
- h : 고온 열원
- hy : 수력

1. 서 론

현대사회의 급격한 산업화로 인한 석유자원의 고갈과 심각한 환경오염 문제로 기존 에너지를 대체할 수 있는 친환경적인 대체에너지원인 신재생에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 관련하여 신재생에너지를 사용한 전력생산 방법 중 하나가 태양열을 이용한 소규모 유기랭킨사이클 발전시스템이다. 유기랭킨사이클(ORC : Organic Rankine Cycle)은 기존 랭킨사이클의 수증기 발생에 적합하지 않은 60°C ~ 200°C 영역의 저온열원을 이용하여 비등점이 낮은 유기물질을 작동유체로 사용하는 발전시스템이다. 기존의 증기원동소 사이클에 낮은 비등점을 갖는 프레온이나 탄화수소계통의 유기냉매를 이용하여 낮은 열원으로 전력생산을 할 수 있는 장점을 갖기 때문에 적용 범위 또한 넓다. 또한, 태양에너지는 무공해, 무제한 청정에너지원이며 기존 화석에너지에 비해 지역적 편중이 적기 때문에 이를 이용한 태양열시스템에 대한 연구는 필수적이다. 태양으로부터 오는 복사광선을 태양열 집열기(SC, solar collector)에서 흡수해서 열에너지로 변환 또는 저장하여 건물의 냉난방 및 급탕 등에 활용될 수 있으며 유지보수 비용이 적게 발생하여 이전부터 많은 연구가 진행 중이다.

이와 관련된 최근 연구를 살펴보면 Du *et al.*⁽¹⁾은 히트파이프 태양열 수집에 대한 실험 연구의 요구를 만족 시킬 수 있는 안전성과 신뢰성 실험 플랫폼을 개발하였고, Hull⁽²⁾은 열전달계수 및 일반적인 매니폴드에 연결된 히트파이프의 흡수기 배열의 열효율을 조사하고, 10개미만의 히트파이프 배열이 기존의 흐름을 통해 집열기보다 훨씬 적은 효율이 있는지 예측 하였다. Roy and Mishra⁽³⁾은 140°C

로 버려지는 연소가스로부터 발전량을 최대
로 설계하기 위하여 R-12, R123, R134a를 이
용한 ORC의 최적화 연구를 수행하였으며,
Sylvain *et al.*⁽⁴⁾은 스크롤 팽창기를 사용하여
ORC의 실험적 연구 및 해석적 연구를 수행하
였다. 또한, Zhang and Wang⁽⁵⁾은 80°C~100°C
의 지열발전용 ORC의 최적화와 초월임계
(Transcritical)사이클 최적화를 비교하여 기
술하였으며, Eom *et al.*⁽⁶⁾은 ORC 저온열원의
특성에 따라 개방형과 순환형으로 분류하고,
이에 따른 ORC 시스템 최적화 방법의 차이를
성능해석 측면에서 비교하였다. 또한 Sébastien
Declaye⁽⁷⁾은 팽창기의 다양한 종류에 따른 기
계적 효율과 전기적 효율을 나타내었다.

하지만 기존의 연구는 태양열 시스템과의
연계성이 부족하고 이를 활용한 일 년간의 에
너지 발생량에 대한 연구는 거의 찾아보기 힘
들다. 또한 현재 개발 중인 ORC 시스템은 대
규모 공장에서 발생하는 폐열을 이용하여 가
정이나 건물의 전력을 공급하고 있으나 초기
투자 비용에 비해 효율이 낮고 유지보수 비용
이 커 현재는 상용화에 많은 어려움이 있다.
따라서 본 논문에서는 일반 가정에 공급되는
전력을 R134a를 이용한 유기랭킨 발전시스템
과 히트파이프를 적용한 진공관형 태양열 집
열시스템을 사용하여 연중 월별 평균일사량
과 외기온도에 따른 성능을 분석하고 팽창기
에서 발생한 일을 여러 가지 운전조건 변화에
따라 해석하였다. 본 연구를 통하여 R134a 적
용 발전용 랭킨사이클을 성능예측과 효율 향
상을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. R134a 적용 태양열 발전시스템 모델링

그림 1은 본 연구에서 설계한 R134a 적용
태양열 발전시스템의 개략도를 보여주고 있

다. 시스템은 크게 두 가지 부분으로 태양열
집열시스템과 R134a의 발전시스템으로 구분
할 수 있다. 태양열 집열시스템은 태양열 집
열기, 증발기(이중관식 열교환기), 보조탱크,
증발기, 증발기(이중관식 열교환기), 보조탱크,

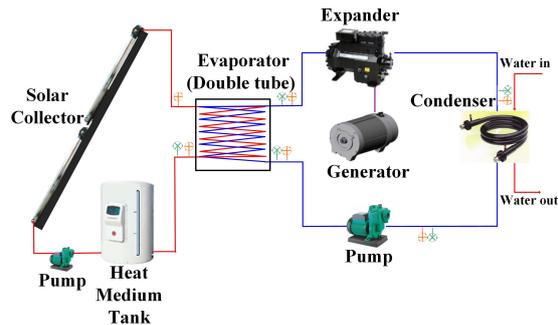


Fig. 1 Schematic diagram of R134a generator system

순환펌프로 구성되어 있으며, 태양열 집열기
는 히트파이프를 활용한 이중진공관형으로
모델링하였다. 태양열 집열시스템에서 평균일
사량과 외기온도는 신재생에너지 데이터센터
⁽⁹⁾에서 제공하는 광주지역의 연간 월평균 일
사량과 외기온도를 조건을 해석에 적용하였
다. 또한 펌프에서 토출된 작동유체는 태양열
집열기에서 가열된 후 증발기에서 R134a와
열교환하고 보조탱크를 지나 다시 순환펌프
로 공급된다.

R134a의 발전시스템은 펌프, 증발기(이중
관식 열교환기), 팽창기, 응축기, 발전기로 구
성되어 있다. 펌프에서 토출된 R134a는 증발
기에서 태양열 집열기의 작동유체와 열교환
하여 고온고압의 상태로 팽창기로 유입된다.
유입된 R134a는 팽창기에서 팽창된 후에 응
축기로 공급되며 응축기에서 응축된 후에 다
시 펌프로 공급되어 순환한다. 이때 팽창기
에서 발생된 동력은 발전기로 전달되어 전력을
생산하게 된다.

표 1은 태양열 집열시스템의 설계사양을

나타내었다. 하나의 태양열 집열기는 20개의 이중진공관형 히트파이프를 이용하였으며, 한 세트가 8개의 집열기를 직렬로 연결하여 사용하였다. 본 연구에서는 이러한 집열기 세트를 3개 병렬로 사용하였으며 총 면적은 47.52 m²이다. 또한 내부의 작동유체를 0.01 kg/s로 3개의 시스템을 병렬로 사용 하였으며 전체 흐르는 물의 질량유량을 0.03 kg/s로 해석하였다.

Table 1. Specification of solar collector

Item	Specification
Type	Evacuate tube with heat pipe
Area	47.52 m ² (8개×3열)
Mass flow rate of water	0.03 kg/s

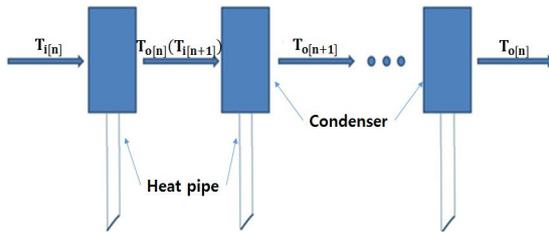


Fig. 2 Schematic of fluid flow in the condenser part.

그림 2는 이중진공관형 태양열 집열기에서 응축기 부분에서의 유체흐름 개략도를 보여주고 있다. 각 집열기의 관을 지나는 작동유체는 매니폴드에 유입되어 히트파이프의 응축기와 열교환하여 가열 후 토출된다. 식(1)은 히트파이프의 응축기 부분에서 외부의 표면 온도를 구하는 수식을 나타내고 있다.⁽¹⁰⁾

$$T_{con[n]} = \frac{(T_{i[n]} + \frac{T_{evap[n]}A_{hp}}{U_{con}A_{con}\sum R_{hp}})}{(1 + \frac{A_{hp}}{U_{con}A_{con}\sum R_{hp}})} \quad (1)$$

이때 응축기의 총괄열전달계수는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{con} = \frac{1}{\frac{t_{hp}}{k_{hp}} + \frac{1}{\frac{N_u \cdot k}{D_{hy}}}} \quad (2)$$

수력직경 D_{hy} 는 $D_i - D_o$ 으로 구할 수 있다. 하나의 관에 의해 얻을 수 있는 가용에너지 회수율은 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_u = A_a F' [G(\tau\alpha)_e - U_L(T_{hp} - T_a)] \quad (3)$$

A_a 는 히트파이프의 열교환 면적, $(\tau\alpha)_e$ 는 히트파이프에서 유효투과율과 흡수율의 곱을 나타낸다. 또한 식(4)는 태양열 집열기의 응축기에서 히트파이프의 토출온도를 나타낸다.

$$T_{hp[n]} = T_a + \frac{G(\tau\alpha)}{U} - \frac{T_{o[n]} - T_{i[n]}}{NTU_{hp[n]}} \quad (4)$$

또한 집열기에서 작동유체의 토출온도는 식(5)을 통해 구할 수 있으며, $[n]$ 은 파이프의 개수이다.

$$T_{o[n]} = T_i + \frac{\epsilon_{[n]}(T_{hp[n]} - T_{i[n]})A_{hp}}{U_{con}A_{con}R_{hp}} (1 + \frac{A_{hp}}{U_{con}A_{con}R_{hp}}) \quad (5)$$

태양열 집열기의 효율은 식(6)을 통해 구할 수 있다.

$$\eta_{solar\ collector} = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{AG} \quad (6)$$

펌프의 등엔트로피 효율과 펌프에서 소요되는 동력은 식(7)과 (8)을 사용하여 계산하였다.

$$\eta_{pump} = \frac{h_{o,s} - h_i}{h_o - h_i} \quad (7)$$

$$\dot{W}_{pump} = \eta_{pump} \dot{m}_{R134a} (h_{o,s} - h_i) \quad (8)$$

또한, 팽창기에서의 등엔트로피 효율과 생성되는 동력은 식(9)와 (10)을 사용하여 계산하였다.

Table 2. Simulation conditions

Parameters	Value
Month	1 ~ 12
Mass flow rate of R134a (kg/s)	0.03, 0.035, 0.04, 0.045, 0.05*
Expander efficiency (%)	70, 75, 80*, 85, 90
Pinch temperature (°C)	77
Expander inlet pressure (kPa)	2000

*Basic condition

$$\eta_{expander} = \frac{h_i - h_o}{h_i - h_{o,s}} \quad (9)$$

$$\dot{W}_{sh} = \eta_{expander} \dot{m}_{R134a} (h_i - h_{o,s}) \quad (10)$$

식(11)은 R134a 랭킨사이클의 열역학1법칙에 의한 열효율이며, 식(12)는 열역학2법칙에 의한 엑서지 효율을 보여주고 있다.

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{expander} - \dot{W}_{pump}}{\dot{Q}_h} \quad (11)$$

$$\eta_{II} = \frac{\eta_I}{1 - \frac{T_a}{T_h}} \quad (12)$$

태양열 집열시스템에 흐르는 고온의 작동유체(물)의 질량유량은 0.01 kg/s, 집열기 입구측 온도는 40°C로 가정하였으며 총 3개의 집열시스템에서 토출되는 작동유체는 증발기에서 R134a와 열교환을 한다. 본 연구에서 설계된 증발기와 응축기는 이중관식 열교환기로 해석하였으며 각 유체의 입구의 조건을 활용한 ϵ -NTU법을 이용하여 해석하였다.

또한 표 2는 히트파이프 이용한 이중관형 태양열 집열기와 R134a 랭킨사이클 활용한 발전시스템의 운전조건을 나타냈다. 본 연구에서 일반 가정에 한 달 동안 공급되는 전력을 300 kWh/mon으로 가정하여 월별 평균일사량과 평균외기온도의 변화에 따른 성능해석을 진행하였다. 이때 집열기의 작동유체인 물의 질량유량은 0.03 kg/s로 고정하였으며, R-134a의 질량유량은 0.05 kg/s이며, η_{pump} 는 90%, $\eta_{expander}$ 는 80%를 기준조건으로 월별 성능을 해석하였다. 또한 10월의 기후조건에서 R-134a의 질량유량을 0.05 kg/s, η_{pump} 는 90%, $\eta_{expander}$ 는 80%를 준으로 R134a의 질량유량을 0.03 kg/s에서 0.05 kg/s까지 0.005 kg/s의 변화에 따라

성능해석을 진행하였으며, 팽창기 효율의 변화에 따른 성능특성을 고찰하기 위하여 팽창기 효율을 70%에서 90%까지 5%의 차이로 변화를 주어 성능을 해석하였다.

본 연구에서 증발기에서 R134a와 집열기 출구의 작동유체와의 최저온도차는 태양열 집열기의 토출온도가 가장 낮은 12월을 기준으로 77°C이상의 온도차를 가지도록 설계하였다. 또한 팽창기를 포함한 고단의 압력은 집열기에서 토출열량이 낮은 12월의 운전조건을 기준으로 설계하였으며 이때 증발기 출구에서 R134a의 토출온도는 68.6°C로 R134a

를 충분히 기상으로 팽창기에 공급시키기 위하여 주어진 온도에서의 포화압력보다 낮은 2000 kPa로 가정하여 해석을 진행하였다. 또한 응축기 출구에서 R134a의 온도를 20°C로 일정하다고 가정하였으며 이 때 펌프 입구에서 액체 상태를 유지하기 위하여 응축기 출구의 압력은 과냉도 5°C를 설정하여 680 kPa로 가정하였다. 또한 이러한 운전조건은 기존의 실험적 연구^(4~9)의 결과를 고려하여 설정하였다.

3. 성능해석 결과 및 토의

그림 3은 본 연구에서 해석된 이중관형 태양열 집열기의 효율을 외기온도와 실내온도 차이에 따라 보여주고 있다. $(T_{in} - T_a)/G$ 의 변화는 태양열 집열기에 의해 회수되는 유용에너지에 영향을 주어 태양열 집열기의 효율에 비례하여 감소하였으며, 외기온도가 일정할 경우 집열기 입구측 온도가 높아질수록 집열기의 효율은 73.8%에서 24.4%까지 태양열 집열기의 효율이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 집열기 입구에서 작동유체의 온도가 높아

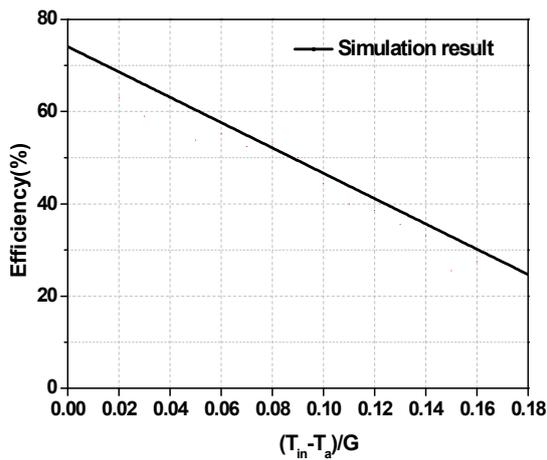


Fig. 3 Efficiency variation of the glass evacuated tube solar collector using heat pipe.

질수록 집열기에서 집열 효율이 감소하고, 이에 집열용량이 낮아지기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 효율 특성을 가지는 히트파이프를 이용한 이중관형 집열기를 R134a 랭킨사이클과 연계하여 시스템의 성능을 예측하였다.

그림 4는 연중 태양열 집열기의 작동유체 토출온도, 집열기의 집열용량, 외기온도, 그리고 일사량을 나타내고 있다. 외기온도의 경우 8월이 가장 높게 나타난 반면 일사량과 집열기 출구온도는 10월에 각각 769.95 W/m²와 118.4°C로 가장 높게 나타났다. 이는 8월의 경우 외기온도는 가장 높으나 잦은 소나기나 장마철의 영향으로 일사량이 상대적으로 적기 때문이다. 또한 일사량이 증가함에 따라 집열기 출구온도와 집열열량이 함께 증가하였으며, 최대의 일사량을 가지는 10월에 가장 큰 집열열량인 20.4 kW를 나타냈으며 12월이 가장 적은 13.6 kW를 보였다.

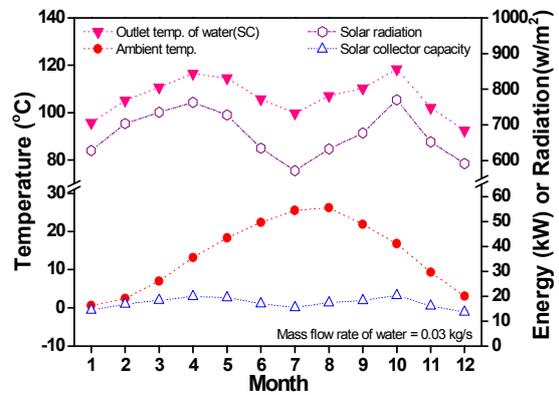


Fig. 4 Variation of outlet temperature and heat gain of solar collector, ambient temperature, and solar radiation with different months in a year.

그림 5는 연중 각 달의 R134a의 팽창기 입·출구온도, 팽창기 토출압력, 발생동력의 변화를 보여주고 있다. 본 연구에서 해석을 위한 기본조건으로 R134a의 질량유량은 0.05 kg/s,

펌프 효율과 팽창기 효율은 각각 90%, 80%로 가정하였다. 그림 4에서 태양열 집열기에서 공급되는 열용량이 10월이 가장 높기 때문에 10월의 R134a의 팽창기 입구온도가 76.1°C로 가장 높은 값을 보였다. 이에 따라 10월의 팽창기 발생동력이 0.91 kW로 가장 크게 나타났다. 반면 12월의 팽창기 입구의 온도는 68.6°C로 10월에 비하여 7.5°C 낮아지는 것으로 나타났으며, 12월의 발생동력은 10월에 비하여 약 6.1% 감소하는 것을 확인하였다. 이는 집열열량의 감소로 팽창기의 입구온도가 낮아져 팽창기에서의 엔탈피 차의 감소로 인하여 팽창기의 발생동력이 작아지기 때문이다.

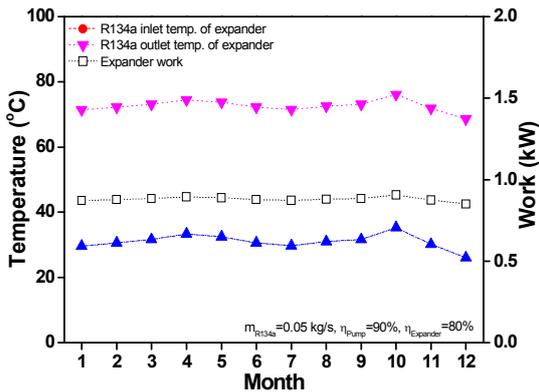


Fig. 5 Variation of inlet and outlet temperature of R134a expander, expander work and outlet pressure of R134a expander with different months in a year.

그림 6은 각 달에서의 팽창기 발생동력, 열역학 1·2법칙에 따른 효율, 증발기에서의 열량을 나타내고 있다. 증발기에서의 태양열 집열기로부터 전달되는 열량이 증가함에 따라 팽창기 입구로 유입되는 R134a의 온도가 상승하여 팽창기 발생동력이 증가하는 것으로 나타났다. 집열기에서 R134a ORC사이클의 집열열량이 가장 큰 10월에서의 열역학 1법칙 효율은 12.2%로 나타났으며, 집열열량이 가장

작은 12월의 경우 11.8%로 감소하였다. 또한 열역학 2법칙에 의한 엑서지 효율은 8월이 18.2%로 가장 낮은 1월에 비해 6.6% 높게 나타났다. 이는 엑서지 효율의 분모에 영향을 미치는 외기온도와 집열기의 온도비가 1월이 가장 작기 때문이다.

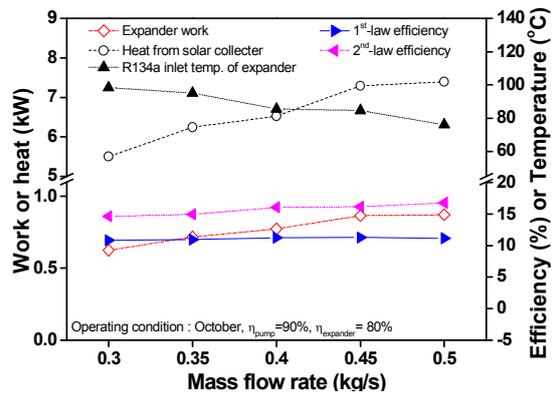


Fig. 6 Variation of expander work, heat gain from solar collector, expander R134a inlet temperature, 1st and 2nd-law efficiency with mass flow ratio of R134a.

그림 7은 R134a의 질량유량에 따른 팽창기의 발생동력, 입구온도, 그리고 열역학 1·2법칙에 따른 효율, 증발기에서 열량을 나타내고 있다. 운전조건은 열용량이 가장 높은 10월을 기준으로 하였으며, 이때 펌프 효율, 팽창기 효율은 각각 90%, 80%로 가정하였다. R134a의 질량유량이 0.05 kg/s 이상 증가시킬 경우 태양열 집열기에서 공급되는 작동유체와의 열교환되는 열용량은 증가하나 증발기에서 모든 R134a의 상변화에 필요한 열량에 미치지 못하여 이상상태가 되며 팽창기 발생일이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 설계한 시스템에서 경우 R134a의 질량유량을 0.05 kg/s 이하에서 운전되도록 설계하여야 한다. R134a의 질량유량이 0.03 kg/s 일 때 팽창기 발생동력과 입구온도는 0.63 kW

와 98.3°C, 0.05 kg/s일 때 0.87 kW와 76.1°C로 팽창기 발생동력은 약 39.4% 증가하였으며 입구온도는 22.2°C의 차이를 보였다. 팽창기의 발생동력이 증가한 이유는 R134a의 질량유량의 증가로 시스템 내의 팽창기 입구에서의 온도증가와 작동유체의 질량증가로 발생동력이 증가하기 때문이다. 또한 입구온도가 감소된 이유는 R134a의 질량유량이 증가할수록 증발기의 단면적에 대한 R134a의 열전달속도가 증가하기 때문이다. R134a의 질량유량이 증가할수록 열역학 1법칙효율은 질량유량이 0.03 kg/s에서 0.05 kg/s로 증가할수록 10.8%에서 11.2%로 0.4%증가하는 것으로 나타났으며, 열역학 2법칙에 의한 엑서지 효율은 최대 2.1% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

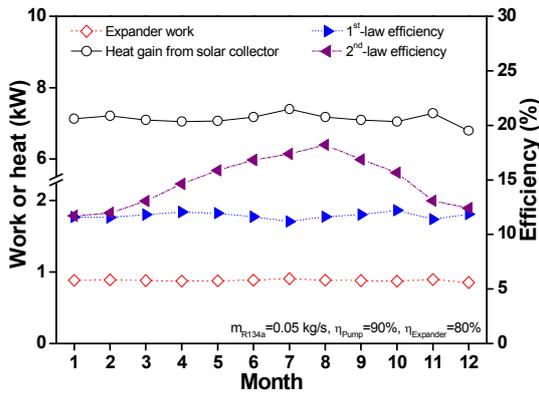


Fig. 7 Variation of expander work, heat gain from solar collector, 1st and 2nd-law efficiency with different months in a year.

그림 8은 팽창기 효율에 따른 팽창기의 발생동력, 출구온도, 그리고 열역학1·2법칙에 따른 효율, 증발기에서의 열량을 보여주고 있다. 본 연구에서 10월의 운전조건을 기준으로 펌프효율 90%, 작동유체의 질량유량을 0.05 kg/s로 고정한 후 팽창기 효율을 70%~90% 까지 변화시켜 가며 해석을 수행하였다. 해석

결과 팽창기 효율이 70%일 때 팽창기의 출구온도와 발생동력은 각각 37.6°C와 0.79 kW, 90%일 때 각각 33.1°C와 1.1 kW로 출구온도는 4.5°C 감소하며, 발생동력은 39.2% 증가하였다. 팽창기의 효율이 증가할수록 토출온도가 감소하는 이유는 효율의 증가로 인하여 팽창기에서 엔탈피차가 증가하고, 이에 따라 팽창기 출구에서의 R134a의 엔탈피 감소로 이어지기 때문이다. 또한 팽창기 효율이 70%에서 90%로 증가할수록 열역학 1법칙에 의한 효율은 팽창기 효율이 증가함에 따라 4.8%에서 6.3%까지 1.5% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 증발기에서 얻어진 열량은 일정하나 팽창기의 발생동력이 증가하기 때문이다. 또한 열역학2법칙에 의한 엑서지 효율도 팽창기 효율이 증가할수록 2.2% 증가하며, 이는 열역학 1법칙 효율의 상승과 발생동력의 증가로 팽창기의 토출온도가 감소하기 때문이다.

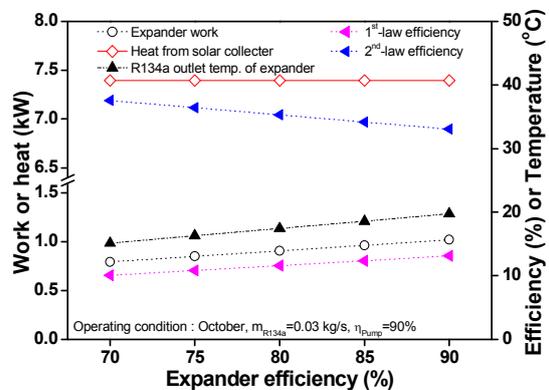


Fig. 8 Variation of expander work, heat gain from solar collector, expander R134a outlet temperature, 1st- and 2nd-law efficiency with expander efficiency.

4. 결 론

본 논문에서는 R-134a를 적용한 ORC사이클의 성능을 연중 월별 평균일사량과 외기온

도에 따라 해석하고 팽창기에서 발생한 일을 여러 가지 운전조건 변화에 따라 예측하였다. 이를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 설계된 태양열 집열기의 입구 온도가 높아질수록 집열기 효율은 73.8%에서 24.4% 약 49.4% 감소하였으며 태양열 집열기의 일년중 10월의 일사량과 집열기 토출온도는 769.9 W/m²와 118.4°C로 가장 높은 것으로 확인되었다.
- (2) 10월 중 R134a의 팽창기 입구온도 및 발생동력은 12월에 비해 발생동력은 13.2%, 집열기 토출온도는 28.5%, R134a의 팽창기 입구온도는 22.6% 높게 나타났다. 열역학 1법칙 효율은 12월이 10월에 비해 2.1% 높게 나타났으며, 열역학 2법칙에 의한 엑서지 효율은 가장 높은 7월은 가장 낮은 2월에 비해 14.7% 높게 나타났다.
- (3) R134a의 질량유량에 따라 팽창기 발생동력은 약 39.4% 상승하였으며 열역학 1법칙 효율은 0.4%, 열역학 2법칙에 의한 엑서지 효율은 2.1% 증가하였다. 팽창기 효율에 따라 발생동력의 차이는 39.2%이며 팽창기 효율이 증가할수록 열역학 1법칙에 의한 효율이 1.5%, 열역학 2법칙에 의한 엑서지 효율도 2.2% 증가하는 것으로 확인되었다.

Reference

1. B. Du, E. Hu, M. Kolhe. An experimental platform for heat pipe solar collector testing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013, Vol.17, pp. 119 -125.
2. Budihardjo I, Morrison GL. Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters. *Solar Energy* 2009, Vol.83, No.1, pp. 49 - 56.
3. Roy, J. P. and Mishara, M. K., Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using Organic Rankine Cycle, *Journal of Energy*, 2010, Vol. 35, No.12, pp. 5049-5062.
4. Sylvain Q, Vincent L, Jean L, Experimental study and modeling of organic rankine cycle using scroll expander, *Applied Energy*, 2010, Vol. 87, pp. 1260-268.
5. Zhang, S. and Wang, H., Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle(ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation, *Applied Energy*, 2011, Vol. 88, No. 8, pp. 2740-2754
6. Eom, H., Yoon, C., Kim, Y., Shin, D., and Kim, C., Optimization study on the performance analysis of Organic Rankine Cycle for characteristics of low temperature heat sources, *Korean Journal of Air- Conditioning and Refrigeration Engineering*, 2012, Vol. 24, No. 1, pp. 51-60.
7. Sébastien Declaye, Sylvain Quoilin, Ludovic Guillaume, Vincent Lemort, Experimental study on an open-drive scroll expander integrated into an ORC (Organic Rankine Cycle) system with R245fa as working fluid, *Energy*, 2013, Vol.55, pp.173-183
8. H. H. Eum, Performance analysis and experimental study of ORC for characteristics of low temperature heat source, Thesis of MS, Hannam University, 2012.
9. New&Renewable Energy Data Center, Korea, <http://www.kredc.net/>
10. Tong, Y.J. and Cho H.H. Theoretical analysis of evacuated heat pipe solar collector with different tilt angle and operating conditions, *Cryogenics and Refrigeration-Proceedings of ICCR2013*, 2013; D-2-13.