

유기랭킨사이클 적용 스크롤 팽창기 성능 특성 연구

신 동 길[†], 김 영 민, 김 창 기
한국기계연구원 그린동력연구실

Operating Characteristics of a Scroll Expander Used in Organic Rankine Cycle

Dong Gil Shin[†], Young Min Kim, Chang Gi Kim

Engine R&D Team, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

(Received July 26, 2011; revision received October 14, 2011)

ABSTRACT: The rapid increases in global energy demand and global warming need renewable energy sources such as solar thermal energy, biomass energy and waste heat. A ORC-based micro-CHP system(< 10 kWe) is one of the effective means to use renewable energy and solve energy problems because of its compactness, flexibilities and lower cost compared to other systems. The most important core components of the ORC is the expander which has a strong effect on the cycle efficiency. In the range of power output from 1 to 10 kW, the scroll expander is a good choice due to its performance and reliability. In this study, we have carried out an experimental study on an ORC equipped with oil-free scroll expander working with refrigerant R134a. We have measured power output and thermal efficiencies of the ORC and analyzed correlation between volumetric efficiencies of the expander and thermal efficiencies of the ORC.

Key words: Renewable energy(신재생에너지), Micro-CHP(초소형 열병합발전), ORC(유기랭킨사이클), Scroll expander(스크롤 팽창기)

기 호 설 명

T	: 온도 [°C]
P	: 압력 [bar]
D	: 밀도 [kg/m ³]
h	: 엔탈피 [kJ/kg]
s	: 엔트로피 [kJ/kg · K]
\dot{m}	: 질량유량 [kg/s]
\dot{Q}_{in}	: 투입 열량 [kJ/s]
η	: 효율 [%]

1. 서 론

지속적인 에너지 수요 증가 및 지구온난화에 대응하기 위해 대체에너지의 필요성이 증대됨에 따라 태양열, 지열, 바이오매스 등 신재생에너지 열 및 제철소, 발전용 엔진, 소각로, 공장 등 각종 산업 활동에서 발생하는 폐열을 이용하여 발전하는 기술에 대한 필요성이 증가되고 있다. 특히, 건물단위의 소규모 에너지 수요를 충족하기 위해 유기랭킨사이클(Organic Rankine Cycle; ORC) 시스템을 이용하는 발전 출력 10 kWe급 이하의 초소형 열병합발전(Micro-CHP) 기술에 대한 잠재 수요가 급속한 증가 추세에 있으나 아직 본격적으로 상용화 되고 있지 못하고 있는 실정이다.^(1,2) 일반적으로 초소형 열병합발전에서는 내연기관, 스팀 엔진, 스팀 랭킨 및

[†] Corresponding author
Tel.: +82-42-868-7387; fax: +82-42-868-7305
E-mail address: sdk@kimm.re.kr

ORC 등을 적용하고 있다.

내연기관을 이용한 Micro-CHP는 이미 상용화되어 많이 보급되고 있으며, 열효율이 높아 공급 열량 대비 전력생산능력이 높은 장점을 가지고 있지만, 소음, 진동 및 유지비용이 높고 바이오연료 외에 다른 신재생에너지의 복합 활용이 불가능한 단점이 있다.

스털링 엔진을 이용한 Micro-CHP는 바이오 연료, 태양열, 바이오매스 등 다양한 신재생에너지의 활용 발전이 가능하고 열효율도 높지만 시스템 단가가 매우 높다.

랭킨 및 ORC를 이용한 Micro-CHP는 연구개발단계에 있으며, 다양한 신재생에너지와 여러 온도 조건에서 발전이 가능할 뿐만 아니라 고가의 스텔링 엔진과 비교할 때 경제성 면에서도 유리하여 타 기술에 비해 많은 장점이 있다.⁽³⁾

ORC는 끓는점이 낮은 냉매 등을 작동유체로서 사용하기 때문에 스팀 랭킨사이클 보다 시스템 작동 온도와 압력을 낮출 수 있어, 전체 시스템 안정성 및 경제성 면에서도 유리한 점을 많이 가지고 있다. 최근 태양열과 바이오매스 보일러 및 폐열 등의 복합 열원을 이용하여 발전하는 ORC 이용 초소형 열병합 발전에 관한 몇몇 연구가 진행되어져 왔으나, 소용량 출력(< 10 kW)에 적합하게 개발된 팽창기 부족으로 시스템 개발이 더디게 진행되고 있다.⁽¹⁾ 따라서, 향후 ORC 기반 Micro-CHP의 상용화에는 소용량 팽창기에 관한 기술개발이 필수적이다.

본 연구에서는 소용량 팽창기 중 하나인 스크롤 팽창기를 프로토타입(Proto type)으로 제작하고, 이를 ORC 시스템을 적용하여, 스크롤 팽창기의 성능 효율 등의 특성분석을 위한 실험을 수행하였고, 팽창기의 체적효율과 전체 사이클의 효율의 상관관계를 분석하여, 향후 팽창기 기술의 중요 개발요소를 파악하고자 하였다.

2. ORC 시스템 실험장치 구성

본 연구에서는 유기 랭킨사이클을 Fig. 1과 같이 증발기(Evaporator), 재생 열교환기(Regenerator), 팽창기(Expander), 응축기(Condenser) 및 냉매 펌프(Pump) 등으로 구성하였다. 작동유체는 R134a를 사용하였으며, 각 시스템에서의 열역학적 상태를 R134a의 T-s 선도인 Fig. 2에 도시하였다. 냉매펌프는 액체상태의 냉매를 펌핑하여 재생기 및 증발기로 압송한다.

재생기 및 증발기에서는 압축액 상태의 냉매에 열이 가해져 고온고압 증기상태로 변환되는 상변화가 일어난다. 팽창기에서는 과열증기 상태의 냉매가스가 엔탈피를 잃으면서 동력이 발생된다.

팽창기를 제외한 구성품들은 상용제품을 이용하였으며, 핵심부품인 팽창기는 상용화된 제품이 없으므로 Fig. 3과 같은 형상의 상용 스크롤 공기 압축기(흡입부피 : 148 cc, 부피비 : 4.05)를 개조하여 제작하였다. 본 연구에 사용된 스크롤 압축기는 무윤활 공기 압축기이고, 외부와의 누설방지 구조가 구비되어 있지 않기 때문에 냉매의 누설을 막기 위한 개조작업을 진행하였다.

팽창기는 냉매가 가진 열에너지를 축 동력으로 전환하는 역할을 하며, 팽창기 효율은 ORC 시스템 전체 열효율에 가장 중요한 영향을 미친다.

ORC에 사용되는 팽창기에는 작동유체의 운동에너지를 축 동력으로 전환하는 터빈방식(Turbine type)과 유체의 압력에너지를 축 동력으로 변환하는 용적식(Positive displacement type) 2종류가 있다.⁽³⁾ 터빈방식은 수만 rpm 영역에서의 고회전수로 작동되며, 가격이 상당히 고가이다. 반면, 용적식 팽창기

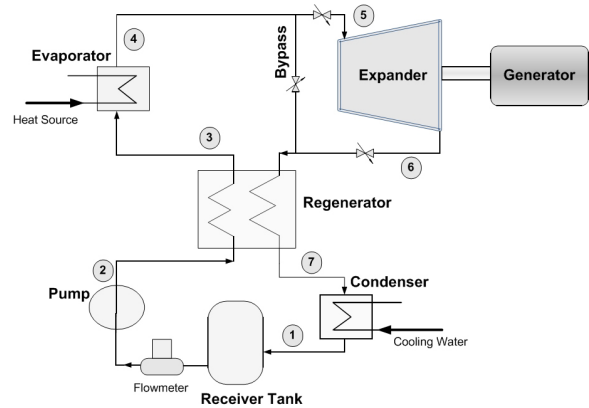


Fig. 1 Schematic diagram of ORC system.

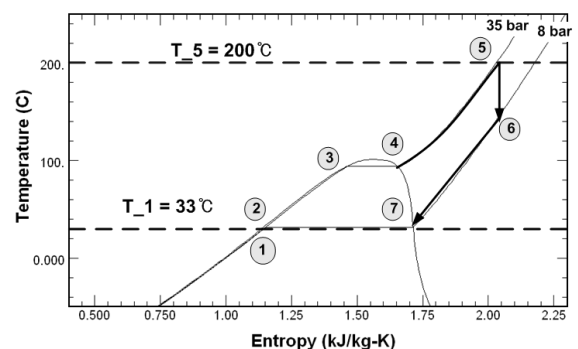


Fig. 2 T-s diagram of R134a.

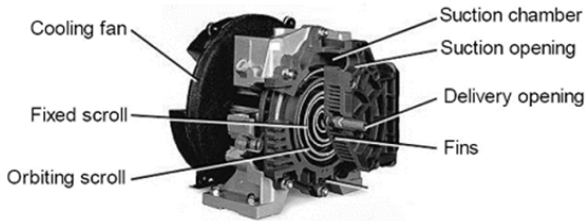


Fig. 3 Oil free scroll air compressor.

는 회전수는 수천 rpm 수준이고, 가격도 저렴하여 ORC 상용화에 유리하다. 1~10 kW 출력에 적합한 용적식 팽창기의 종류에는 스크류(Screw), 로터리 베인(Rotary vane), 반켈엔진(Wankel engines), 스크롤(Scroll), 사판식(Swash plate) 등 여러 방식이 있지만, 그 중에서도 스크롤 팽창기가 성능이나 신뢰성면에서 Micro-CHP에 적합한 것으로 평가되고 있다.^(1,3)

스크롤 팽창기 작동원리는 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 고정 스크롤 중심부로 고압의 가스가 유입되면, 고압의 가스가 부피 팽창하면서 선회 스크롤을 밀어내 동력을 발생시킨다. 스크롤 압축기는 고효율, 저소음, 저진동의 장점을 가지고 있으며 현재 냉동이나 공기 압축기로 널리 사용되고 있으며, 스크롤 팽창기의 경우 아직 본격적인 상용화 단계에 있진 않지만, 최근 몇몇 연구자에 의해 활발한 연구가 진행되었다. Kim et al.은 스팀으로 작동되는 스크롤 팽창기를 설계 제작하여 체적효율 52%, 팽창기 전효율 34%의 실험결과를 얻었다.⁽⁴⁾ Saitoh et al.⁽⁵⁾은 스크롤 팽창기를 적용하여 태양열 이용 ORC 시스템을 구축하여 팽창기 효율 65%, 사이클 열효율 11%의 결과를 얻었다. Kane et al.⁽⁶⁾은 태양열과 바이오디젤엔진의 복합 사이클에 스크롤팽창기를 적용한 연구를 수행하였다. Lemort et al.⁽⁷⁾은 작동 유체로는 냉매 R123을 사용하고, 무윤활 공기압축기를 개조한 프로토타입의 스크롤 팽창기를 이용

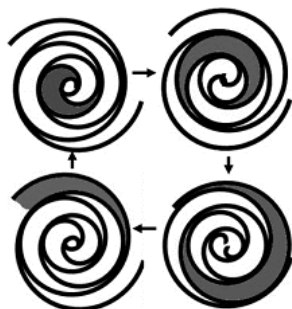


Fig. 4 Principle of scroll expander.

하여 ORC 실험장치를 구성하여, 1.8 kW의 팽창기 출력과 68%의 등엔트로피 효율을 얻었다.

3. 사이클 해석

특성실험에 앞서 시스템의 이론 열효율과 실험을 통해 산출된 실제 열효율을 비교하기 위해 먼저 사이클 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 현재 냉동용으로 시판되고 있는 냉매 중에서 팽창기의 비출력을 고려하여 R134a를 작동유체로 선정하였다.

Fig. 2의 R134a의 T-s 선도에서 보이는 바와 같이 응축온도는 33°C, 증발온도는 200°C이며, 각 스텝별 열역학적 물성치를 Table 1에 나타내었다.

각 스텝의 열역학적 과정은 다음과 같다.

Step 1→2 : 펌프에 의한 등엔트로피 압축

Step 2→5 : 열교환기에서의 등압 가열

Step 5→6 : 팽창기에서 등엔트로피 팽창

Step 6→7 : 재생기에서 등압 냉각

Step 7→1 : 응축기에서 등압 냉각

펌프에 의한 펌핑동력을 고려하지 않은 시스템 이론 열효율은 식(1)로 정의될 수 있다.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{e,th}}{\dot{Q}_{in}} \quad (1)$$

이론 팽창동력 및 작동유체에 가해진 열량은 Table 1의 물성치의 엔탈피 차이에서 식(2)에 의하여 구할 수 있다.

$$\dot{W}_{e,th} = h_6 - h_5, \quad \dot{Q}_{in} = (h_5 - h_2) - \eta_{re}(h_7 - h_6) \quad (2)$$

여기서, η_{re} 는 재생열교환기 효율이다.

Table 1 Thermodynamic properties in the ORC

Step	T (°C)	P (bar)	D (kg/m ³)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg · K)
1	33.01	8.39	1175.50	246.09	1.16
2	34.64	35.00	1187.00	248.36	1.16
3	93.73	35.00	791.62	351.87	1.46
4	93.73	35.00	252.02	422.23	1.65
5	200.00	35.00	104.36	577.02	2.03
6	142.79	8.39	26.09	529.86	2.03
7	33.01	8.39	40.99	416.26	1.71

사이클 해석 결과는 고온부가 200℃인 조건의 시스템 전체 이론 열효율은 21.9%로 나타났다.

상기와 동일한 과정을 통해, 고온부의 증발온도가 각각 150℃, 100℃이고, 저온부의 응축온도가 33℃인 조건에서 사이클 열효율이 각각 18.5% 및 14%로 계산되었다.

4. ORC 시스템 특성 실험결과

4.1 ORC 시스템 출력 특성

ORC 시스템의 냉매 유량 및 팽창기 회전수가 다양한 조건에서 증발온도를 약 150℃에서 200℃까지 변화시키면서 팽창기 출력을 측정한 결과 Fig. 5와 같이 팽창기 출력은 1~9 kW까지의 넓은 범위의 출력성능을 나타내어, 10 kW급 이하의 Micro-CHP에 적용이 용이할 것으로 판단된다.

4.2 스크롤 팽창기 체적효율 특성

ORC 시스템의 전체 사이클 열효율에 중요한 영향을 미치는 인자는 팽창기 효율이다. 팽창기 출력은 식(3)으로 정의된다.

$$\dot{W}_e = \eta_{ad} \eta_{mech} \eta_v \dot{m}_{meas} (h_{in} - h_{out}) \quad (3)$$

여기서, η_{ad} 는 팽창기의 단열팽창효율이며, η_{mech} 는 팽창기 기계효율이고, η_v 는 체적효율이며, h_{in} 및 h_{out} 은 각각 팽창기 입출구 엔탈피이다.

체적효율 η_v 는 팽창기 성능과 효율에 지대한 영향을 미치는 변수로서, 실제질량유량에 대한 이론질량유량의 비로서 정의되어 식(4)와 같이 나타내

어지며, 일반적으로 실제질량유량이 이론질량유량보다 크기 때문에 통상 1보다 작은 값을 가진다.

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{th}}{\dot{m}_{meas}} \quad (4)$$

여기서, \dot{m}_{th} 및 \dot{m}_{meas} 은 각각 이론질량유량 및 실제질량유량으로서, \dot{m}_{meas} 은 유량계로 실측한 값을 적용하고, \dot{m}_{th} 는 식(5)를 통해 계산할 수 있다.

$$\dot{m}_{th} = \frac{\rho_{in} V_{in} N}{60} \quad (5)$$

여기서, V_{in} 은 팽창기 형상에 의해 결정되는 행정 체적으로서, 팽창기 1회전당 흡입부피이고, N은 팽창기 분당 회전수이다. 스크롤 팽창기 체적효율에 큰 영향을 미치는 요소는 누설이다. 팽창기 입구로 들어온 작동가스가 랩간 틈새나 랩 끝단으로의 누설에 의해 팽창기 출구로 그대로 방출됨으로써, 팽창기 입구로 들어온 작동가스의 100%가 팽창기 출력에 기여하지 못하고 작동가스의 일부만 출력에 기여하게 되는 현상을 초래함으로써 팽창기 성능과 효율을 떨어뜨린다.

스크롤 팽창기의 체적효율은 팽창기 회전속도, 입구온도 및 압력 등 여러 조건에 의해 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 팽창기 회전수, 입구 압력 및 온도 변화에 따른 체적효율 변화를 실험적으로 확인하였다.

Fig. 6은 작동가스 질량유량 및 팽창기 입구압력이 일정하고, 팽창기 입구 온도가 100℃로 유지된 조

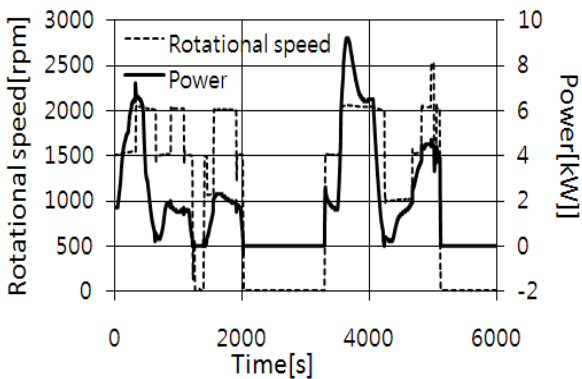


Fig. 5 Power out of ORC.

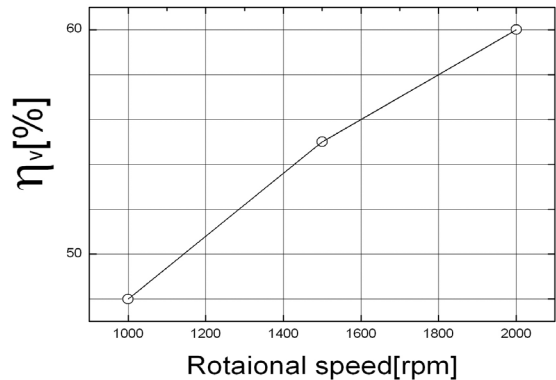


Fig. 6 Volumetric efficiencies with the rotational speed.

건에서 회전속도를 변화시키면서 측정된 체적효율을 도시한 그래프이다. 팽창기 회전수가 증가하면 체적효율이 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 팽창기 회전수가 증가하면 선회스크롤의 원심력이 증가하여 스크롤 랩간 틈새로 누설되는 작동가스의 양이 줄어들기 때문인 것으로 분석된다.

Fig. 7은 팽창기 입구온도가 100°C인 조건에서 팽창기 회전속도를 2000 rpm으로 고정시키고, 팽창기 입구압력을 변화시키면서 체적효율을 측정된 결과이다. 입구 압력변화에 상관없이 체적효율이 60% 수준으로 일정하게 유지되고 있는 것을 볼 수 있다.

팽창기 회전수가 1500 rpm이고, 팽창기 입구 압력을 일정하게 유지한 조건에서 팽창기 입구 온도 상승에 따른 체적효율 변화를 측정된 결과 Fig. 8에서 보이는 바와 같이 온도가 증가함에 따라 체적효율은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 팽창기 입구

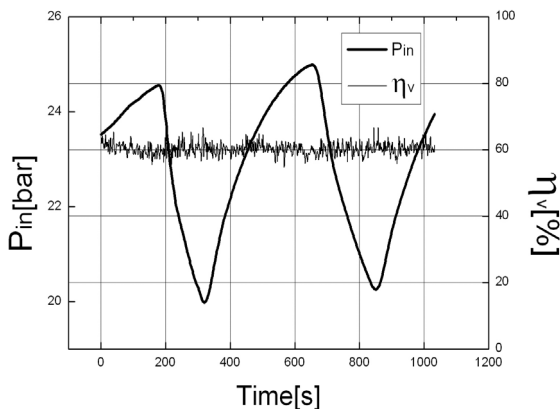


Fig. 7 Volumetric efficiencies for different inlet pressure at 2000 rpm.

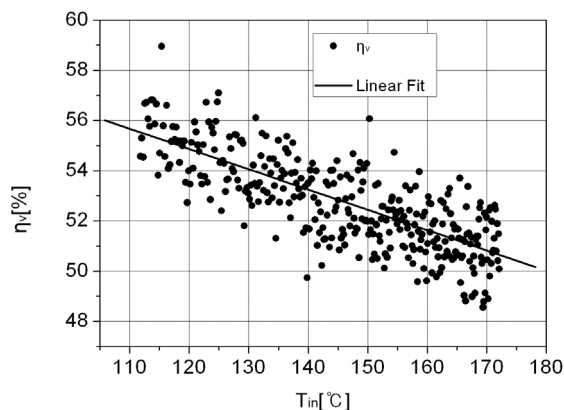


Fig. 8 Volumetric efficiencies with the rotational speed for different inlet temperature.

온도가 상승하면 스크롤 랩의 열 팽창량 및 열변형량이 증가하여 고정 및 선회스크롤 랩간 틈새 간격 및 랩 끝단의 틈새 간격이 늘어남에 따라 작동가스의 누설량이 증가하기 때문인 것으로 분석된다. 팽창기 입구온도가 약 80°C 상승하면 체적효율은 약 6% 정도 감소되는 것으로 나타났으며, 100~180°C 영역에서는 거의 선형적인 관계를 가지고 있는 것으로 관찰되었다.

4.3 ORC 시스템 열효율 특성

ORC 시스템의 냉매 유량, 팽창기 회전수, 팽창기 입구 온도, 입구 압력을 변화시키면서 출력 및 효율을 측정된 결과를 Table 2에 나타냈다. 팽창기 입구 온도 T_{in} 이 증가하면 이론 열효율 η_{th} 및 실제열효율 η_{therm} 은 상승하나, Fig. 9에서 보이는 바와 같이 ORC 사이클의 측정된 실제 열효율은 이론 열효율의 52~60% 수준으로서 큰 차이를 보인다. 이에 대한 원인분석을 위해 본 연구에서는 실제 열효율의 이론 열효율에 대한 비율, 열효율비 R_η 를 식(6)으로 정의하였다.

$$R_\eta = \frac{\eta_{therm}}{\eta_{th}} \tag{6}$$

팽창기의 체적효율과 열효율비 R_η 의 상관관계를 분석하기 위해 Fig. 10에 도시한 결과, 팽창기 체적효율과 열효율비 R_η 가 큰 차이 없이 동일한 패턴임을 보인다. 이에 따라, 실제 열효율과 이론 효율이 큰 차이를 갖는 주요 원인이 팽창기의 낮은 체적효율에 기인한 것으로 분석된다.

따라서 시스템 전체 열효율을 높이기 위해서는 팽창기가 높은 체적효율을 갖는 운전조건에서 시스템을 제어하거나 팽창기의 체적효율을 개선시켜야 함을 알 수 있다.

Table 2 Characteristics of ORC performance for different inlet temperature

T_{in} (°C)	P_{in} (bar)	\dot{Q}_{in} (kW)	\dot{W}_e (kW)	η_v (%)	η_{therm} (%)	η_{th} (%)	R_η (%)
199.3	43.9	62.6	8.3	62.0	13.2	21.9	60.7
149.8	33.7	44.7	4.4	52.6	9.5	18.5	51.6
111.9	31.1	47.6	3.6	54.5	7.3	14.0	52.1

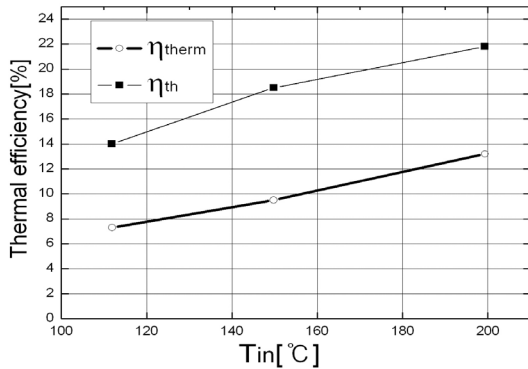


Fig. 9 Comparison of the thermal efficiencies with the theoretical thermal efficiencies.

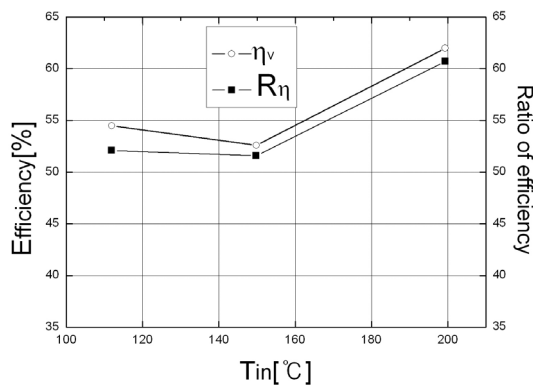


Fig. 10 Comparison of volumetric efficiencies with thermal efficiency ratio.

5. 결 론

본 연구에서는 스크롤 팽창기를 이용하는 유기랭킨사이클(ORC) 시스템의 출력 및 열효율 특성을 파악하기 위한 연구가 실험적으로 수행되었으며, 연구 결과를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 스크롤 팽창기를 적용한 ORC 시스템의 출력 성능은 1~9 kW의 넓은 영역대의 출력성을 나타내어, Micro-CHP에 적용이 가능할 것으로 평가된다.

(2) 스크롤 팽창기의 체적효율은 팽창기 회전수가 증가함에 따라 상승하는 추이를 보인다. 따라서 팽창기가 고회전수에서 운전하여 체적효율을 높이는 것이 바람직하나, 회전수가 증가함에 따라 마찰력이나 진동 등이 증가하여 팽창기 기계효율이 떨어질 수 있으므로 전체 사이클 열효율을 높게 하기 위해서는 체적효율과 기계효율을 같이 고려하여 최적의 회전수 영역을 조사하여 운전하여야 한다.

(3) 스크롤 팽창기 입구 온도가 증가함에 따라 체적효율은 선형적으로 감소하는 경향을 보였으며,

온도가 약 80°C 증가하면서 체적효율이 약 6% 수준 감소하였다. 따라서 온도상승에 따른 체적효율 감소에 대한 해결책에 대한 연구가 필요하다.

(4) ORC 시스템 전체 열효율은 이론 효율에 비해 크게 낮은 52~60% 수준이며, 이는 낮은 팽창기 체적효율에 크게 영향을 받는 것으로 분석되었다.

(5) 팽창기 입구온도가 상승하면 ORC의 이론 열효율은 증가하는 반면, 팽창기 체적효율 감소에 의해 실제 열효율이 감소된다. 따라서 팽창기 입구온도 증가에 의한 각 효율간의 Trade-off 효과를 고려하여 최적 운전조건을 면밀히 조사 연구할 필요가 있다.

참고문헌

1. Qiu, G., Liu, H., and Riffat, S., 2011, Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 3301-3307.
2. Dong, L. L., Liu, H. and Riffat, S. B., 2009 Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems-A literature review, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 2119-2126.
3. Aoun, B., 2008, Micro combined heat and power operating on renewable energy for residential building, MS thesis Ecole des Mines de Paris, Paris, France.
4. Kim, H. J., Ahn, J. M., Park, I., and Rha, P. C., 2007, Scroll expander for power generation from a low-grade steam source, *Proceedings of the IMECHE, Journal of Power and Energy*, Vol. 221, pp. 705-711.
5. Saitoh, T., Yamada, N., and Wakashima, S. I., 2007, Solar Rankine cycle system using scroll expander, *Journal of Environment and Engineering*, Vol. 2, pp. 708-719.
6. Kane, M., Larrain, D., Favrat, D., and Allani, Y., 2003, Small hybrid solar power system, *Energy* Vol. 28, pp. 1427-1443.
7. Lemort, V., Quoilin, S., Cuevas, C., and Lebrun, J., 2009, Testing and modeling a scroll expander integrated into an Organic Rankine Cycle, *Applied Thermal Engineering* Vol. 29, pp. 3094-3102.