

1kW급 유기랭킨사이클용 스크롤 팽창기의 성능 특성에 관한 실험적 연구

김도균 · 윤은구 · 윤상열* · †김경천

부산대학교 기계공학부, *롤스로이스 부산대학교 대학기술연구센터
(2015년 6월 30일 접수, 2015년 8월 25일 수정, 2015년 8월 26일 채택)

Experimental Study on the Performance Characteristics of a Scroll Expander for 1kW-class Organic Rankine Cycle

Dokyun Kim · Eunkoo Yun · Sang Youl Yoon* · †Kyung Chun Kim

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea
*Rolls-Royce University Technology Centre, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received July 5, 2015; Revised August 25, 2015; Accepted August 26, 2015)

요 약

스크롤 팽창기의 성능특성은 유기랭킨사이클 (ORC) 시스템의 성능에 가장 중요한 변수이다. 본 연구에서는 1kW급 ORC 시스템을 구성하여 다양한 작동 조건에서 스크롤 팽창기의 성능특성을 파악하였다. ORC 시스템은 증발기, 스크롤 팽창기, 응축기, 작동유체펌프로 구성되어 있으며, 작동유체로 R245fa를 사용하였다. 고온수 온도는 50kW급 전기히터에 의해 80℃에서 115℃까지 제어되었다. 스크롤 팽창기의 최대 등엔트로피 효율은 77%로 측정되었고, ORC 시스템의 축동력은 열원의 온도 조건 및 팽창기의 회전속도에 따라 0.5kW에서 1.8kW까지 측정되었다.

Abstract - The performance characteristics of a scroll expander is the most important variable for the performance of organic Rankine cycle system. In this paper, the performance characteristics of a scroll expander was identified using 1kW class organic Rankine cycle system with various operating conditions. The ORC system is composed of an evaporator, a scroll expander, a condenser and a working fluid feed pump that uses R245fa as working fluid. The hot water temperature was controlled from 80℃ to 115℃ by the 50kW-class electric water-heater. The maximum isentropic efficiency of the scroll expander was measured about 77%, and the shaft power was measured from 0.5 kW to 1.8 kW according to heat source temperatures.

Key words : Performance Test, Organic Rankine Cycle(ORC), Scroll Expander, Low-grade Heat Recovery, Filling factor

1. 서 론

최근 세계적인 환경파괴 문제들과 에너지 사용량 급증으로 인한 에너지 부족 문제 등이 이슈화되면서

저온 열원의 열 회수에 대한 관심이 커지고 있다. 그에 따라 저온 열원을 이용하는 다양한 에너지 재생 기술들이 개발되고 있다. 이러한 기술들 중에서, 유기랭킨사이클 (ORC) 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 가장 널리 활용되고 있다[1]. ORC 시스템은 전통적인 방식의 랭킨사이클과 달리 물보다 비등점이 낮은 유기냉매를 작동유체로 사용

†Corresponding author:kckim@pusan.ac.kr
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

하여 열에너지를 전기에너지로 변환하는 발전 시스템으로, 시스템의 구성이 간단하고 설계 및 유지보수가 용이하며 발전 과정에서 오염물질 및 온실가스가 방출되지 않는 친환경적인 시스템이다. 또한, ORC 시스템은 산업폐열[2], 지열[3], 태양열[4] 등 현재까지 활용성이 낮아 버려지는 저온열원의 회수를 통해 고급 에너지인 전기를 생산하는 것이 가능하여 전체적인 에너지 효율을 향상시킴으로써 에너지의 효과적인 활용에 이용될 수 있다.

R245fa는 ORC 시스템의 작동유체로 널리 사용되는 냉매 중 하나이다[5,6]. 이 작동유체는 다양한 범위의 열원 온도에 대해 좋은 열적, 물리적 특성을 갖는다. 그리고 ORC 시스템에 사용되었을 때, 오존 파괴 및 지구 온난화 가능성이 낮고, 비독성, 비가연성 물질이다. 또한, R245fa는 온도에 대한 포화증기의 엔탈피 변화율이 0보다 큰 건유체로, 팽창기 내부에서의 팽창이 기체 상태로만 이루어지기 때문에 액체에 의한 팽창기의 손상 위험이 없다는 장점을 가지고 있다[7].

팽창기는 ORC 시스템의 가장 중요한 요소로, 터빈과 같은 터보형 팽창기와 스크롤, 스크류, 피스톤 등의 용적형 팽창기의 두 종류로 분류할 수 있다[8]. 이 중에서 터빈은 용량이 작거나 운전조건이 설계영역을 벗어났을 경우에 효율이 급격히 저하하며 출력의 감소에 따라 회전 속도가 급격히 증가하기 때문에 소규모 장치에 적합하지 않다. 반면에 용적형 팽창기는 안정적이고 높은 효율을 가지며, 특히 간단한 작동 구조와 넓은 출력 범위를 갖는 스크롤 팽창기는 소형 시스템에 적합하다[9].

소형 ORC 시스템에 사용되는 스크롤 팽창기는 기존의 무급유식 공기압축기나 가정용 또는 자동차용 에어컨의 냉매 압축기로 사용되던 스크롤 압축기를 개조하여 만들어진 것이 대부분이다. 본 연구에서는 최초로 상용화된 Air-Squared사의 ORC용 스크롤 팽창기인 E15H22N4.25를 이용한 성능실험을 통해 스크롤 팽창기의 성능특성을 파악하고자 한다.

II. ORC 시스템 실험장치 구성

2.1. 스크롤 팽창기

성능실험에 사용된 스크롤 팽창기는 Air-Squared의 E15H22N4.25 제품이며, Fig. 1에 나타내었다. Table 1에는 성능실험 대상인 스크롤 팽창기의 주요 사양을 나타낸다.

Fig. 2는 스크롤 팽창기의 축동력 측정을 위한 팽창기 모듈의 외관을 나타낸다. 토크 측정을 위하여 코지인터내셔널의 스트레인게이지 타입의 토크센

서인 TCR-2KM 제품을 사용하였으며, ONO SOKKI의 Magneto-type의 RPM센서인 MP-981 제품을 사용하여 팽창기 회전속도를 측정하였다. 토크센서와

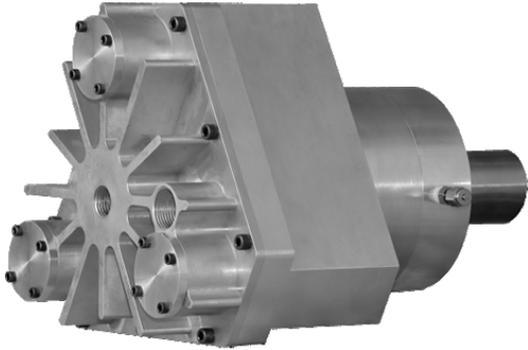


Fig. 1. Appearance of scroll expander.

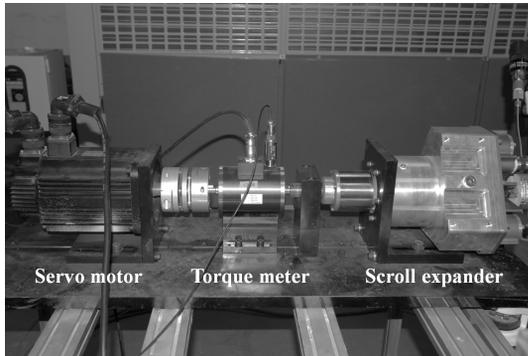


Fig. 2. Expander module of ORC system.

Table 1. Specification of Scroll Expander

	Value	
Nominal output	1 kW _e	
Volume ratio	3.5	
Displacement	12 cm ³ /Rev	
Max. Speed	3,600 RPM	
Max. Inlet pressure	13.8 bar _a	
Max. Inlet temperature	175 °C	
Ambient temp. Range	-20°C - 40°C	
Nominal sound level	55 dB(A)	
Net weight	9kg	
Port configuration	1/2" NPT	3/4" NPT

시스템의 열효율은

$$\eta_{cycle} = (\dot{W}_{shaft} - \dot{W}_{pp}) / \dot{Q}_{ev} \quad (4)$$

팽창기 등엔트로피 효율은

$$\eta_{expander} = \dot{W}_{shaft} / \dot{m}_R (h_{ex,in} - h_{ex,out}) \quad (5)$$

시스템의 열역학 2법칙 효율은

$$\eta_{energy} = \eta_{cycle} / (1 - T_{cv} / T_{cd}) \quad (6)$$

IV. 실험결과 및 고찰

실험결과는 2400 RPM, 3000 RPM, 3600 RPM의 세 가지 조건에 대하여 분류하였으며, Table 2에 정리된 정상상태 운전 조건에서의 측정값을 이용해 팽창기의 축동력, 시스템의 열효율, 팽창기의 등엔트로피 효율, 시스템의 열역학 2법칙 효율을 계산했다.

실험을 통해 측정되는 값에는 측정 장치에 의한 측정 오차가 포함되어 있으며, 계산에 포함되는 각각의 측정 오차들이 결합되어 Uncertainty가 전파된다. 측정변수는 유량, 압력, RPM, 온도, Torque이며, 각각에 대한 측정 정밀도는 2.1과 2.3에 나타내었다. 이 때, 계산된 값 Y의 Uncertainty는 측정 변수인 X, 계산된 값인 Y, Uncertainty인 U에 대하여

$$U_Y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \right)^2 U_{X_i}^2} \quad (7)$$

Table 2. Experimental conditions

Test	RPM	P _{ex,in}	P _{ex,out}	T _{hw,in}	T _{cw,in}
1-9	2400	6	1.4-2.7	80	20-40
10-26	2400	10	1.6-4.9	100	23-60
27-46	2400	13.6	1.8-4.9	115	23-58
47-55	3000	6	1.4-2.7	80	21-40
56-72	3000	10	1.6-4.9	100	22-58
73-92	3000	13.6	1.8-4.9	115	21-58
93-101	3600	6	1.4-2.7	80	21-40
102-118	3600	10	1.6-4.9	100	21-58
119-138	3600	13.6	1.8-4.9	115	18-57

과 같이 나타낼 수 있으며, 실험결과에 대하여 계산된 Uncertainty를 Error bar로 표시하였다.

4.1. 2400 RPM

Fig. 5에서 Fig. 8은 2400 RPM에 대한 실험의 결과를 나타낸다. 팽창기의 축동력 및 시스템의 열효율은 팽창기 입구와 출구의 압력비가 클수록 증가하는 경향을 보이며, 팽창기의 축동력은 팽창기 입구 압력이 증가함에 따라 커진다. 최대 1.39 kW의 축동력과 8.16 %의 열효율이 계산되었다. 팽창기의 등엔트로피 효율 및 열역학 2법칙 효율은 압력비가 클수록 감소하며 최적의 압력비보다 압력비가 작아지면 급격히 감소하는 경향을 보인다. 2400 RPM에서의 최적의 압력비는 2.75이며, 이 경우 최대 75.3 %의 팽창기 등엔트로피 효율과 56.8%의 열역학 2법칙 효율이 계산되었다.

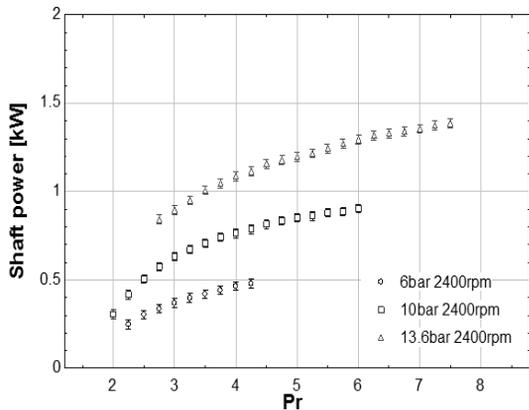


Fig. 5. Shaft power at 2400 RPM.

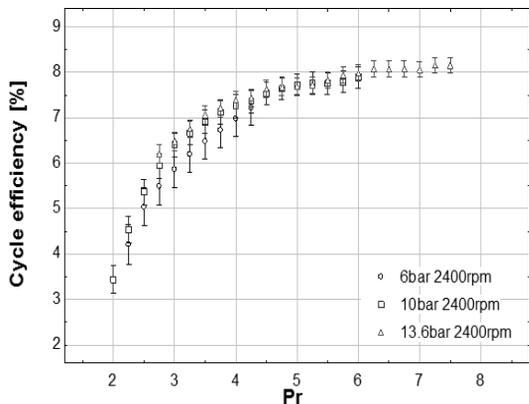


Fig. 6. Cycle efficiency at 2400 RPM.

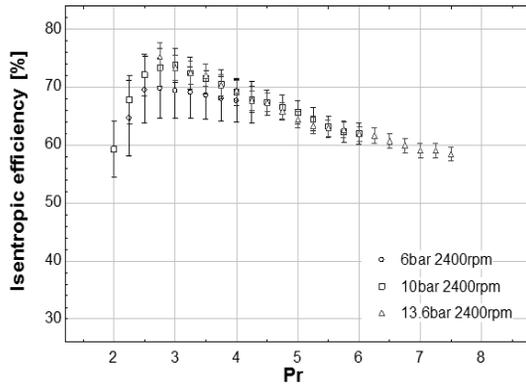


Fig. 7. Isentropic efficiency at 2400 RPM.

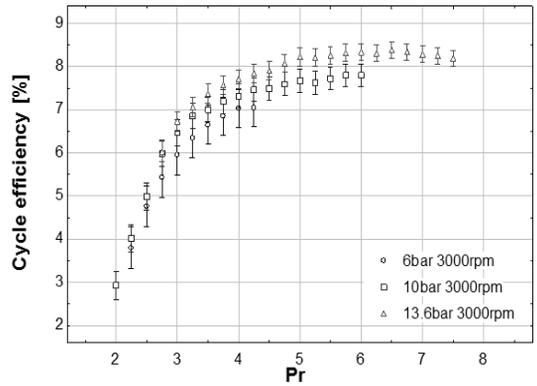


Fig. 10. Cycle efficiency at 3000 RPM.

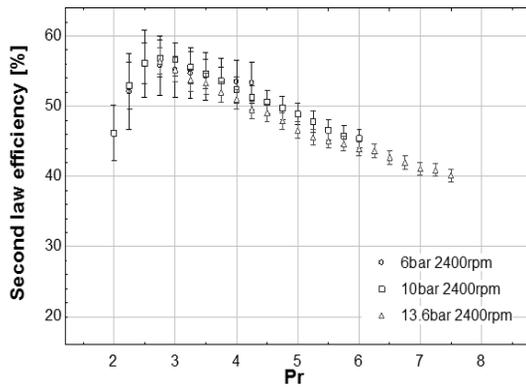


Fig. 8. Second law efficiency at 2400 RPM.

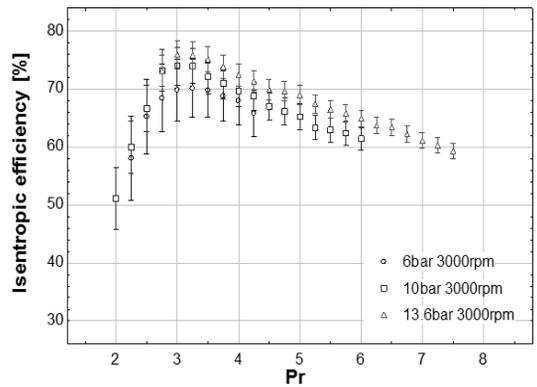


Fig. 11. Isentropic efficiency at 3000 RPM.

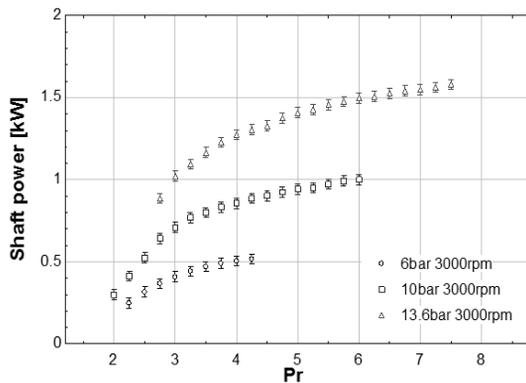


Fig. 9. Shaft power at 3000 RPM.

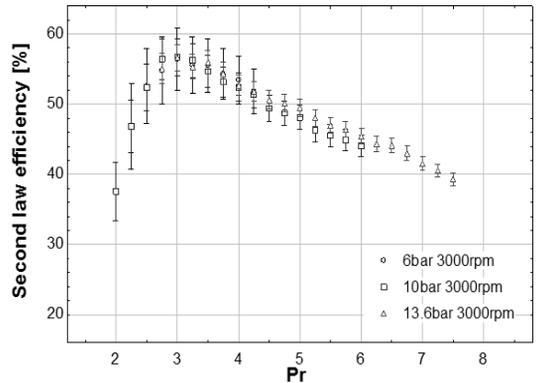


Fig. 12. Second law efficiency at 3000 RPM.

4.2. 3000 RPM

Fig. 9에서 Fig. 12는 3000 RPM에 대한 실험의 결과를 나타낸다. 최대 1.58 kW의 축동력과 8.38 %의

열효율이 계산되었다. 3000 RPM에서의 최적의 압력비는 3이며, 최대 76.0 %의 팽창기 등엔트로피 효율과 56.6%의 열역학 2법칙 효율이 계산되었다.

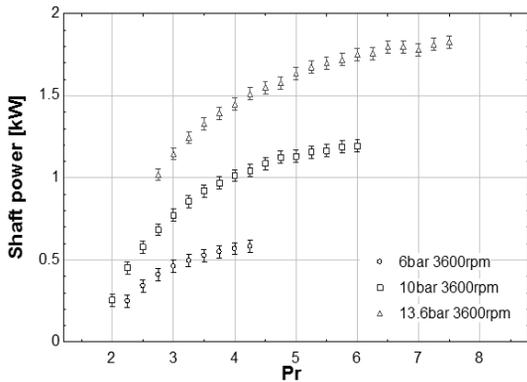


Fig. 13. Shaft power at 3600 RPM.

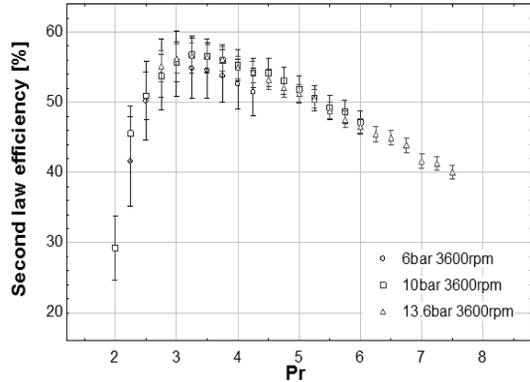


Fig. 16. Second law efficiency at 3600 RPM.

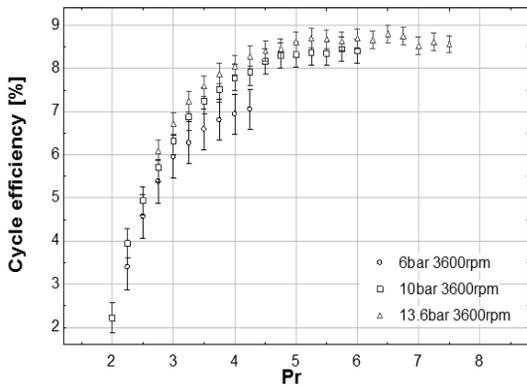


Fig. 14. Cycle efficiency at 3600 RPM.

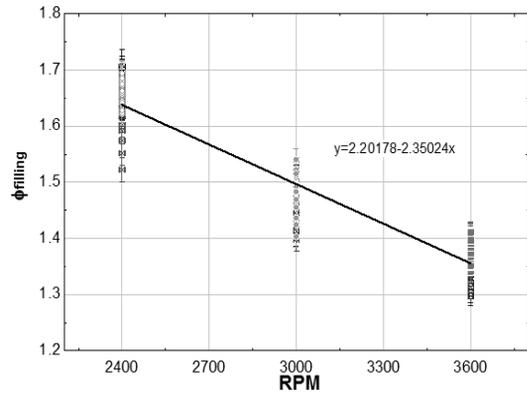


Fig. 17. Filling factor with RPM.

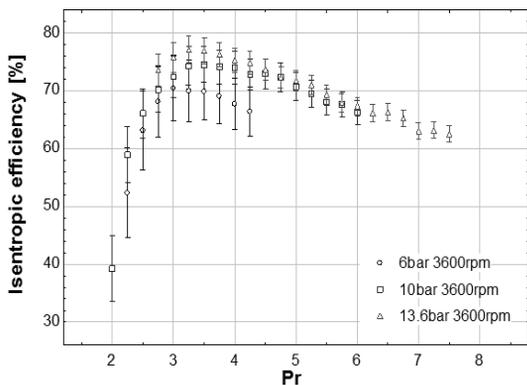


Fig. 15. Isentropic efficiency at 3600 RPM.

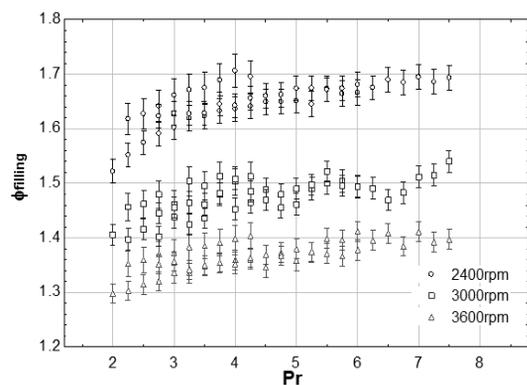


Fig. 18. Filling factor with pressure ratio.

4.3. 3600 RPM

Fig. 13에서 Fig. 16는 3600 RPM에 대한 실험의 결과를 나타낸다. 최대 1.83 kW의 축동력과 8.80 %의

열효율이 계산되었다. 3600 RPM에서의 최적의 압력비는 3.25이며, 최대 77.1 %의 팽창기 등엔트로피 효율과 56.8%의 열역학 2법칙 효율이 계산되었다.

4.4. 충전율

팽창기의 충전율은 실제 측정된 작동유체의 질량 유량과 팽창기의 체적에 따른 이론적인 질량유량의 비로 정의되며, 팽창기의 성능에 주요한 변수 중 하나으로써 다음과 같은 방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\phi_{filling} = \frac{\dot{m}_{R^{v_{ex,in}}}}{NV_{ex}} \quad (8)$$

Fig. 17과 Fig. 18은 모든 정상상태 운전 조건에서의 충전율을 나타낸다. Fig. 17에서 볼 수 있듯이 충전율은 팽창기의 회전속도에 크게 의존하는 함수이며, 팽창기의 회전속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 2400 RPM에서 1.65, 3000 RPM에서 1.48, 그리고 3600 RPM에서 1.37의 충전율이 계산되었으며, 그에 대한 선형 근사방정식을 Fig. 17에 나타내었다.

Fig. 18과 같이 팽창기에 부과되는 압력비에 따라 각 회전수에서 충전율이 분포하게 된다. 누설은 팽창기의 내부 구조상의 gap에 의해 발생하게 된다. 압력비가 높은 것은 팽창기 입구와 출구에서의 압력차가 크다는 것을 의미하고 압력차가 커지게 되면 압력차에 의해 발생하는 힘 또한 커지게 되어 팽창기 내부에서 더 많은 누설이 생겨 충전율이 증가하게 된다. 이러한 작동유체의 누설은 실제 팽창기에 의한 축동력의 발생에 기여하지 못하기 때문에 각종 효율이 감소하게 된다.

V. 결론

본 연구에서는 최초로 상용화된 Air-Squared사의 ORC용 스크롤 팽창기를 이용한 성능실험을 통해 스크롤 팽창기의 성능특성을 파악하였다.

실험은 2400-3600 RPM의 팽창기 회전속도 조건과 6-13.6 bar의 팽창기 입구 압력 조건에 대하여 진행되었으며, 138개의 정상상태 운전 조건에 대한 측정이 실시되었다. 측정값을 이용해 축동력, 열효율, 팽창기 등엔트로피 효율, 열역학 2법칙 효율, 충전율을 계산하였고, 각 회전수에 대한 실험결과를 Table 3에 요약하였다.

축동력 및 열효율, 최적 압력비, 팽창기 등엔트로피 효율은 팽창기의 회전속도가 증가함에 따라 커지지만, 열역학 2법칙 효율은 팽창기의 회전수의 변화에도 일정한 값이 계산되었다.

열효율은 압력비가 증가함에 따라서 지속적으로 증가하는 경향을 보이며, 최대 압력비에서 최대 열

Table 3. Summary of experimental result

RPM	\dot{W}_{shaft}	η_{cycle}	Pr_{opt}	$\eta_{expander}$	η_{exergy}	$\phi_{filling}$
2400	1.39	8.16	2.75	75.3	56.8	1.65
3000	1.58	8.38	3	76.0	56.6	1.48
3600	1.83	8.80	3.25	77.1	56.8	1.37

효율이 계산되었다.

하지만 팽창기 등엔트로피 효율이 최대가 되는 압력비는 팽창기의 체적비가 3.5로 일정한 반면에 회전수에 따라 2.75, 3, 3.25로 변화하였다. 이러한 최적 압력비의 변화는 팽창기의 내부 누설, 마찰 및 진동에 의한 기계 손실, 팽창기 입구와 열교환기 내부에서의 압력 강하와 같은 여러 요인에 의해 결정된다. 낮은 회전수에서는 팽창기의 내부 누설이 팽창기 등엔트로피 효율에 큰 영향을 미치고, 높은 회전수에서는 팽창기의 내부 누설에 의한 영향이 줄어드는 대신 기계 손실과 압력 강하가 큰 영향을 미친다.

열역학 2법칙 효율은 팽창기 등엔트로피 효율과 밀접한 관계를 가지기 때문에, 최대 열역학 2법칙 효율을 가지는 압력비는 rpm 조건에 따라 최대 등엔트로피 효율이 계산되는 최적 압력비와 동일하였다.

충전율은 회전속도의 증가에 따라 감소하고, 압력비가 커질수록 증가하였다. 충전율의 증가는 작동유체의 누설이 많은 것을 의미하며 축동력의 발생에 기여하지 못하기 때문에 각종 효율이 감소하게 된다.

감사의 글

이 논문은 한국에너지기술평가원의 지원과 한국연구재단 지원과제(No. 20132020000390, 20142010102800, No. 2011-0030013)에 의하여 연구되었음.

사용기호

- h : enthalpy [kJ/kg]
- \dot{m} : mass flow rate [kg/s]
- N : rotational speed [rev/min]
- Pr : Pressure ratio [-]
- \dot{Q} : heat [kW]
- T : torque [kgf · m]
- V : swept volume of expander [m³/rev]
- v : specific volume [m³/kg]
- \dot{W} : power [kW]
- η : efficiency [%]

ϕ : filling factor [-]
 cd : condenser
 cw : cooling water
 ev : evaporator
 ex : expander
 hw : hot water
 in : inlet
 out : outlet
 pp : pump
 R : working fluid

REFERENCES

- [1] Tchanche, B. F., Lambrinos, G., Frangoudakis, A. and Papadakis, G., "Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles - A review of various applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**(8), 3963-3979, (2011)
- [2] Dai, Y., Wang, J. and Gao, L., "Parametric Optimization and Comparative Study of Organic Rankine Cycle (ORC) for Low Grade Waste Heat Recovery", *Energy Conversion and Management*, **50**(3), 576-582, (2009)
- [3] Madhawa, Hettiarachchi H. D., Golubovic, M., Worek, W. M. and Ikegami, Y., "Optimum Design Criteria for an Organic Rankine Cycle Using Low-Temperature Geothermal Heat Sources", *Energy*, **32**(8), 1698-1706, (2007)
- [4] Quoilin, S., Orosz, M., Hemond, H. and Lemort, V., "Performance and Design Optimization of a Low-Cost Solar Organic Rankine Cycle for Remote Power Generation", *Solar Energy*, **85**, 955-966, (2011)
- [5] Rayegan, R. and Tao, Y. X., "A Procedure to Select Working Fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs)", *Renewable Energy*, **36**, 659-670, (2011)
- [6] Hung, T. C., Wang, S. K., Kuo, C. H., Pei, B. S. and Tsai, K. F., "A Study of Organic Working Fluids on System Efficiency of an ORC Using Low-Grade Energy Sources", *Energy*, **35**, 1403-1411, (2010)
- [7] Chen, H., Goswami, D. Y. and Stefanakos, E. K., "A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 3059-3067, (2010)
- [8] Qiu, G., Liu, H. and Riffat, S., "Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle", *Applied Thermal Engineering*, **31**, 3301-3307, (2011)
- [9] Declaye, S., Quoilin, S., Guillaume, L. and Lemort, V., 2013, "Experimental Study on an Open-Drive Scroll Expander Integrated into an ORC (Organic Rankine Cycle) System with R245fa as Workingfluid", *Energy*, **55**, 173-183, (2013)