



스크롤 팽창기와 유수분리기 일체형 복수기를 적용한 폐열회수 동력발생 시스템의 성능특성에 관한 연구

A Study on Performance Characteristics of the Waste Heat Recovery Power System Applied a Scroll Expander and the Combined Condenser with Oil Separator

구금재[†]
 Geum-Jae Koo[†]

(Received 13 June 2017, Revision received 07 September 2017, Accepted 08 September 2017)

Abstract: An environment-friendly electric power generation system has been developed which utilizes waste heat of low temperature below 160°C. A scroll expander whose working fluid is steam has been optimally designed and produced as a prime mover. Both a lubricating oil supply unit and an oil separator were applied to the system to operate the system continuously and effectively. The working fluid, steam, normally requires a condenser of big size which is a handicap of a small-sized power recovery system. A unique idea of both applying direct-contact heat exchange method to the condenser and combining the condenser with an oil separator made the power generation system compact and competitive. The scroll expander power system has been fabricated and tested. Test results were consistent well with the simulation results. The system electric power reached 1019W, system efficiency was 5.7% and efficiency of the scroll expander was 67.4%.

Key Words : Scroll expander, Waste heat, Rankine cycle, Condenser, Oil separator

— 기 호 설 명 —

h : 엔탈피	[kJ/kg]
m : 증기 질량유량	[kg/s]
P : 압력	[bar]
S : 엔트로피	[kJ/kgK]
T : 온도	[K]
V : 증기 체적유량	[m ³ /s]
W : 발전 출력	[kW]
η : 효율	[-]

하첨자

b : 보일러
c : 사이클
d : 복수기
e : 팽창기
h : 하이브리드
in : 입구
is : 등엔트로피
out : 출구
s : 시스템

[†] 구금재 : 동명대학교 냉동공조공학과
 E-mail : kg2030@tu.ac.kr, Tel : 051-629-3760

[†] Geum-Jae Koo : Department of Refrigeration & Air-conditioning Engineering, TongMyong University.
 E-mail : kg2030@tu.ac.kr, Tel : 051-629-3760

1. 서 론

오래 전부터 화석연료의 고갈과 연소가스에 의한 대기 오염에 대비하기 위하여 화석연료 의존성을 줄이기 위한 에너지 기술개발이 진행되어 왔다. 태양광, 풍력, 조력, 소형원자로 등 많은 연구가 진행되어 왔으나 실용적으로 본다면 아직 화석연료를 대체할 수준의 기술 확보는 되지 않고 있다. 화석연료는 여전히 지구상에서 그 중요성 면에서 우위를 차지하고 있다. 더구나 기술발전과 선진화에 따라 전 세계 개발도상국들의 에너지 수요는 급증하고 있는 추세이고 향후 중국의 국민들이 에너지를 더 많이 소비하게 된다면 석유자원이 국가 안보를 위협할 수 있는 전략적 품목이 될 수도 있을 것이다.¹⁾ 이러한 사태에 대비하기 위하여 석유 자원의 절약 기술이나 열 시스템의 효율 개선이 필요하다. 아울러 온실가스 배출에 따른 지구 온난화에 대한 우려는 글로벌적으로 인식되고 있으므로 열기관 작동유체의 누설에 따른 오존층 파괴 등의 문제도 동시에 해결되어야 할 과제가 되고 있다.

저온 열원으로부터 동력을 회수하기 위한 기술로서 ORC(Organic Rankine Cycle)가 있으나 기존의 연구들은 주로 작동유체로서 유기냉매를 사용하고 있다.²⁻⁵⁾ 이 경우에 작동유체가 누설되면 환경오염을 유발하는 문제가 있다. 증기를 작동유체로 적용한 사례도 있으나^{6,7)} 실용적 시스템을 위해서는 장기 연속운전 대책 등 추가적인 연구가 필요한 것으로 파악된다.

본 연구에서는 친환경 작동유체를 사용하여 열 시스템의 효율을 개선하기 위하여 연속운전이 가능한 저온의 소형 1 kW급 폐열 회수 동력발생에 관점을 맞추었다. 증기를 작동유체로 하는 최적의 스크롤 팽창기를 설계·제작하여 원동기로 적용하였으며 스크롤 팽창기의 연속적인 운전이 가능하도록 오일 공급 및 유수분리 기능을 포함하여 시스템을 구성하였다. 증기를 작동유체로 사용할 경우, 부피가 큰 복수기가 필요하게 되어 이는 소형 열회수 시스템의 핸디캡이 되므로 본 연구에서는 소형 시스템의 경쟁력을 강화할 수 있도록 복수

기 및 유수분리의 크기를 줄이는 방안을 적용하였다.

2. 이론 해석

2.1 스크롤 팽창기를 적용한 랭킨사이클

증기터빈은 터빈 입구에서의 증기가 과열 상태가 아니면 팽창 과정에서 응축수가 발생할 수 있다. 응축수는 수많은 작은 물방울 형태로 터빈 블레이드와 충돌하여 블레이드의 가장자리를 침식시키는 원인이 된다.⁸⁾ 이에 비해 스크롤 팽창기는 고정 스크롤과 회전 스크롤이 형성하는 여러 쌍의 팽창실로 이루어진 용적형 팽창기로서 폐열 회수용 원동기로 적합하다. 스크롤 팽창실 내부에서 작동유체의 운동 에너지는 증기터빈에 비하여 매우 작기 때문에 응축수가 팽창기 표면을 손상시키지 않으며 팽창 과정 중에 응축이 일어나므로 증기의 잠열 활용도가 높아지며 복수기의 크기를 감소시킬 수 있다. 또한 단단(Single stage)에서의 팽창률을 8~9 정도로 크게 할 수 있으며, 회전 속도를 터빈에 비해 낮게 할 수 있으므로 감속기가 불필요해진다. 증기터빈 사이클과 스크롤 팽창기의 사이클을 Fig. 1의 T-s 선도 상에서 도시하였다. 스크롤 팽창기 운전 시에는 기계적 마찰이 있으므로 이로 인한 효율 저하를 예방하기 위하여 증기에 윤활유를 혼합해 주어야 하며, 팽창 이후에 응축된 물을 증기 발생기로 순환시키기 위해서는 유수분리 기능이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 이러한 필요조건들을 고려하여 Fig. 2와 같이 전체 시스템을 구성하였다.

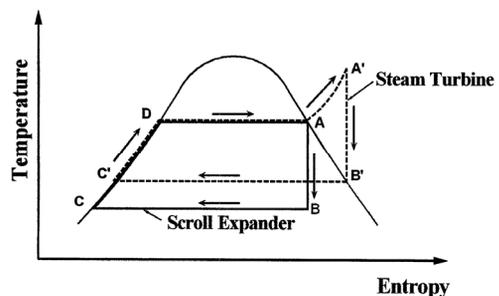


Fig. 1 Rankine cycles

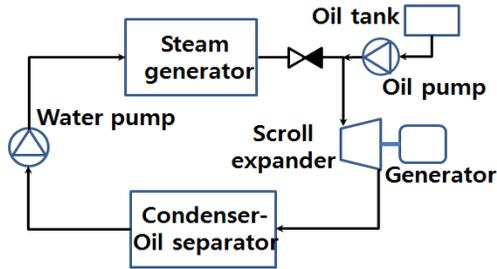


Fig. 2 System layout

2.2 스크롤 팽창기 랭킨사이클 해석

설계 요구 조건을 만족하는 사이클 최적화를 위해서는 사이클의 반복적인 계산이 필요하므로 사이클 코드를 작성하였다. 사이클 코드는 스크롤 팽창기, 유수분리기, 복수기, 펌프 및 스팀 제너레이터 입·출구의 압력, 온도, 유량, 밀도, 엔탈피, 엔트로피 및 건도(Quality)를 계산하여 각종 효율과 출력을 산정한다. 팽창기 효율, 사이클 효율, 시스템 효율 및 하이브리드 효율은 각각 식(1)~(4)에 의하여 계산된다.

$$\eta_e = \frac{h_{e,in} - h_{e,out}}{h_{e,in} - h_{e,out, is}} \quad (1)$$

$$\eta_c = \frac{h_{e,in} - h_{e,out}}{h_{e,in} - h_{d,out}} \quad (2)$$

$$\eta_s = \frac{\eta_b W}{m(h_{e,in} - h_{d,out})} \quad (3)$$

$$\eta_h = \frac{\frac{W}{m} + \eta_d(h_{e,out} - h_{d,out})}{\frac{h_{e,in} - h_{d,out}}{\eta_b}} \quad (4)$$

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

스크롤 팽창기 동력발생 시스템의 전체 모습은 Fig. 3과 같다. 각 장치는 간격을 줄여서 배치하고 배관 손실을 최소화하기 위해 자연스러운 유동 경로가 되게 하였다.

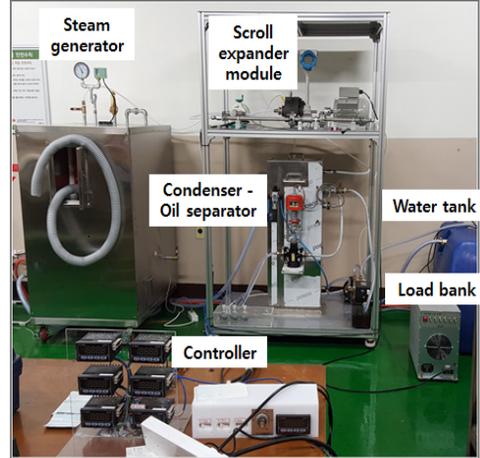


Fig. 3 System configuration

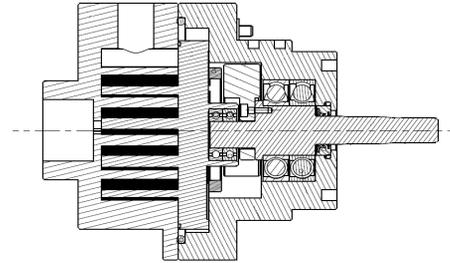


Fig. 4 A section of the scroll expander



Fig. 5 The scroll expander

스크롤 팽창기는 설계점인 3.95의 팽창비로 랩을 구성하였고 대수나선을 결정하는 공전 반경비는 증기 유속을 고려하여 설정하였으며, 떡지수는 0.8로 설정하여 행정체적을 증가시켰다. 선회스크롤은 편심되어 회전하므로 진동을 감소시키기 위해 밸런스 웨이트를 적용하였다. 회전속도는 감속

기 없이 발전기와 직결이 가능하도록 3,600 rpm으로 설정하였다. 윤활시스템은 팽창기 입구 배관에 윤활유를 증기에 혼합하여 넣고 복수기에서 오일을 분리하는 방법으로 구성되었다. Fig. 4는 스크롤 팽창기의 축방향 단면 형상이고, Fig. 5는 제작된 모습이다.

본 연구에서는 복수기와 유수분리기를 일체화시켜 콤팩트한 구조를 고안하여 적용하였다. 작동 원리는 Fig. 6에서와 같이 증기와 윤활유가 혼합된 기체가 하우징 내부에 담겨 있는 물속에 분사된다(A). 분사된 혼합 기체 중 증기는 물과 섞여 직접 접촉 열교환 방식에 의해 응축되어 물로 변환되어 응축수 출구(B)로 나와 보일러로 공급된다. 오일은 비중 차이로 인해 부상하여 상층부에 모여서 오일 출구(C)로 흘러나온다. 물은 지속적으로 공급되는 증기로 인해 온도가 상승한다. 이를 사용자가 필요로 하는 온도의 온수를 공급하

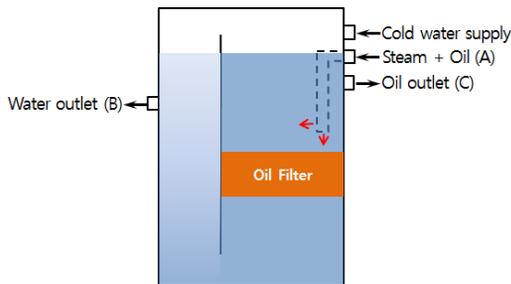


Fig. 6 Concept of the combined condenser with oil separator

Table 1 Design data for the combined condenser

Heat transfer rate		20 kW
Dimensions (L×W×H)		500×800×700 mm
Inlet	Temperature	101.6°C
	Pressure	1.08 bar abs
Outlet	Flow rate	8.50 g/s(Steam + Oil)
	Temperature	84.6°C
	Pressure	1.00 bar abs
	Flow rate	7.73 g/s(Water)
	Quality	0

기 위하여 온도조절밸브를 적용한다. 본 고안은 실외 냉각장치 없이 시스템 구성이 가능하며 열교환율이 높고 열전달 벽면이 없으므로 오염(Fouling) 문제가 없다는 장점이 있다⁹⁾. Table 1에 설계 데이터를 요약하였다.

3.2 실험 방법

성능 평가를 위해 무부하 운전, 예비 시험, 성능 개선, 부하 성능 시험을 실시하였다. 고온부 증기 배관에서 누설이 발생할 경우 연구원을 보호하기 위하여 장비에서 떨어져있는 제어 및 모니터링 장치에서 운전이 가능하도록 하였다.

열병합용 발전기는 운전 특성상 정격 출력을 연속적으로 내는 것이 그 역할이므로 본 실험에서도 정격 출력에 초점을 맞추어 부하 성능 시험 절차를 구성하였다. 먼저 증기발생기에서 버너를 가동하여 증기 압력을 6 bar까지 상승시킨다. 이후 Discharge valve를 열어서 증기를 스크롤 팽창기에 공급하면 스크롤 팽창기가 회전한다. 스크롤 팽창기가 정격 회전속도에 도달하면 Discharge valve의 개폐를 조정하여 정격 속도가 유지되도록 한다. 이후 Load bank에서 탭 스위치를 연결하여 부하를 투입한다. 부하가 투입되면 회전속도가 감소하게 되므로 Discharge valve를 더욱 열어서 스팀 공급량을 증대시켜 정격 속도로 맞춘다.

4. 결과 및 고찰

실험과 비교평가를 위하여 먼저 사이클 해석을 수행하였다. Table 2와 Fig. 7은 정격 발전 출력, 1,000 W에 대한 사이클 해석결과이다.

Table 2 Scroll expander cycle analysis

Parameter	Condenser Outlet	Boiler Inlet	Expander Inlet	Expander Outlet
P [bar]	1.00	6.32	5.87	1.08
T [K]	357.8	358.0	431.2	374.8
h [kJ/kg]	354.4	355.5	2755.2	2552.2
S [kJ/kgK]	1.130	1.131	6.766	6.999
Quality	0.000	0.000	1.000	0.944

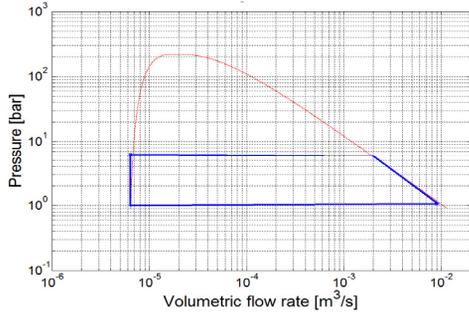


Fig. 7 P-V diagram for the expander cycle

Table 3에 실험 조건을 정리하였다. Test 1과 Test 2는 길들이기 전·후로 구분되며 실험 변수의 차이는 크지 않으나 실험결과, 출력의 변화를 보여주고 있다. Test 2의 결과는 여러 차례의 시험 후 연속운전이 가능한 안정된 상태의 실험결과이다.

Table 3 Test conditions

Parameter	Test 1	Test 2
Expander inlet Pressure [bar]	5.95	5.86
Expander inlet Temp. [°C]	158.5	157.9
Expander outlet Pressure [bar]	1.17	1.19
Expander outlet Temp. [°C]	104.0	104.4
System power [W]	930	1019

Fig. 8과 9에서 실험과 해석결과를 비교하였다. 두 개의 실험결과 모두, 팽창기 입구의 증기 온도와 압력은 해석결과에 잘 부합하고 있다. 팽창기 출구의 증기 온도, 압력 데이터는 실험과 해석이 근소한 차이를 보이고 있으나 팽창기 입구에서 출구로의 전이는 그 추세선이 실험과 해석이 유사한 경향이므로 팽창기의 거동은 초기에 설계된 운전 경로를 잘 따르고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에 출력에 대한 팽창기 입구 압력의 관계를, Fig. 11에 출력에 대한 팽창기 입구 온도의 관계를 실험과 해석결과를 각각 나타내었다. 초기 단계의 Test 1은 출력은 낮는데 압력, 온도 모두 해석결과보다 높게 나왔지만 길들이기가 끝난 단계의 Test 2는 온도, 압력, 및 출력 모두 해석결과에 잘 부합하고 있다. 이는 초기 단계는 스크롤의 마찰이 높고 팽창 과정 중에 일부의 증기가 물로

응축되면서 에너지 손실이 크게 발생한 것이 그 원인으로 평가된다.

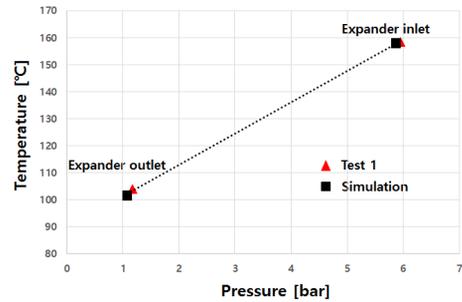


Fig. 8 T-P curve 1 through the expander

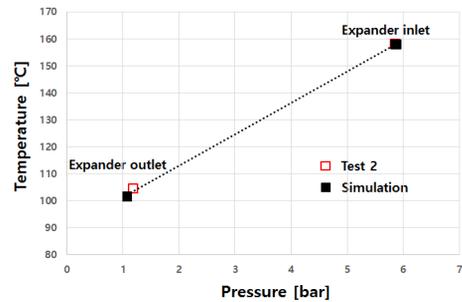


Fig. 9 T-P curve 2 through the expander

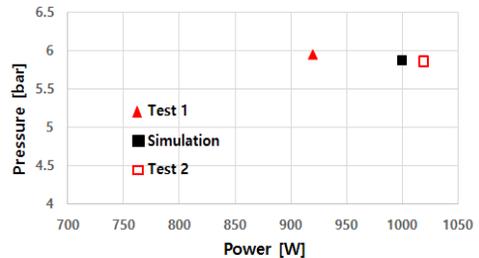


Fig. 10 Expander inlet pressure vs. power

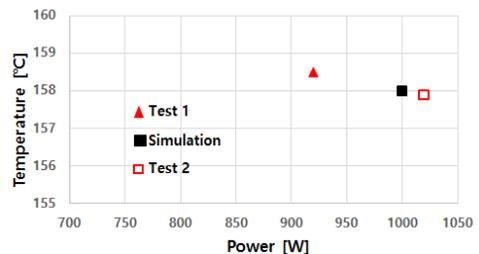


Fig. 11 Expander inlet temperature vs. power

Table 4 Performance data

Description	Test	Simulation
System power [W]	1019	1000
Expander efficiency [%]	67.4	70.0
Cycle efficiency [%]	7.3	8.4

Table 4에 주요 성능 데이터를 실험 조건으로 해석한 결과와 비교하였다. 기존의 스크롤 팽창기는 주로 유기냉매 사이클에 적용되어 작동유체의 상변화에 따른 손실이 작아서 팽창기 효율은 70%에 달한다. 본 연구에서는 친환경 작동유체로서 증기를 채택하였고 증기는 유기냉매에 비하여 비체적이 크기 때문에 스크롤 체적이 증가하는 단점이 있고 체적에 비례하여 마찰 및 표면 열발산 손실이 증가하므로 실험결과의 팽창기 효율이 해석결과에 비하여 낮게 나타난 것으로 평가된다. 사이클 효율은 증기 발생을 위하여 증기 발생기에 투입된 열량에 대한 팽창기가 생산한 일의 비율이다. 즉, 입력 에너지에 대한 출력 에너지의 비율로서 해석결과는 8.4%이나, 실험결과로는 7.3%를 달성하였다. 증기는 포화점 부근에서 온도나 압력의 미세한 변화에 의해서도 건도가 크게 영향을 받으므로 효율이 다소 낮게 나타난 것으로 평가된다.

시스템 효율은 사이클 효율에서 스크롤 팽창기의 기계적 손실, 축 커플링에서의 마찰 손실 및 발전기 효율에 따른 손실을 차감하고 전력으로 변환된 유효 동력에 관한 것으로서 실험결과, 5.7%이다. 하이브리드 효율은 복수기에서 응축열을 버리지 않고 온수로 재활용할 때의 효율로서 70%에 이른다. 따라서 개발된 시스템은 온수의 수요가 많은 지역에서 분산형 독립전원으로 적용되면 큰 경제적 효과가 기대된다.

5. 결 론

160°C 이하의 저온 열원을 친환경적으로 활용하기 위하여 증기를 작동유체로 사용하는 스크롤 팽창기 동력발생 시스템을 개발하여 성능특성을

조사한 바, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개발된 스크롤 팽창기 동력발생 시스템의 발전 출력은 1,019 W, 팽창기 효율은 67.4%, 사이클 효율은 7.3%, 시스템 효율은 5.7%, 하이브리드 효율은 70%이다.

2) 스크롤 팽창기는 증기를 작동유체로 하는 Rankine 사이클로 운전이 가능하였고 사이클 해석과 실험결과가 잘 부합하였다.

3) 스크롤 팽창기에 오일 공급 및 복수기에서 유수분리 기능을 부가함으로써 동력발생 시스템의 연속운전이 가능하였다.

4) 직접 접촉 열교환 방식의 복수기를 적용하여 전체 시스템을 콤팩트하게 구성할 수 있었다.

5) 복수기에서 방출되는 열을 온수공급원으로 활용하면 실외 냉각기가 없어도 폐열회수 동력발생 시스템의 구현이 가능하다는 것을 확인하였다.

6) 증기를 작동유체로 사용하는 스크롤 팽창기 동력발생 시스템은 발전 유효 동력에 비하여 복수기에서의 열방출이 더 크므로 전력보다 온수의 수요가 많은 지역에 더욱 적합하다.

후 기

이 논문은 2016학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(2016A020).

References

1. E. Follath and A. Jung, Translated by T. H. Kim, 2015, "Der neue Kalte Krieg (Resources Warfare)", Younglim Cardinal, pp. 36-40.
2. J. H. Moon, J. S. Yu, H. J. Kim and N. J. Cho, 2012, "Design of Scroll Expander for Electric Power Generation System using Organic Rankine Cycle with Biomass Energy Source", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 30-36.
3. H. J. Kim, J. H. Moon, J. S. Yu and Y. S. Lee, 2013, "Performance Analysis of an Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery of a

- Passenger Car", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 87-94.
4. H. S. Eom, C. S. Yoon and Y. M. Kim, 2013, "Experimental Study on the Operating Characteristics of the Organic Rankine Cycle", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 4 pp. 208-215.
 5. J. H. Joung, B. Kang and H. H. Cho, 2013, "Performance analysis of a small-scale solar power generation system using R134a Rankine cycle", Proceedings of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea 2013 Winter Annual Conference, pp. 337-341.
 6. H. J. Kim, I. S. Park and P. C. Rha, 2005, "Performance Test of Scroll Expander for Micro-Power Generation", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 325-332.
 7. H. J. Kim, J. M. Ahn, I. S. Park and P. C. Rha, 2007, "Scroll expander for power generation from a low-grade steam source", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A, Vol. 221, No. 5, pp. 705-712.
 8. H. P. Bloch, 1996, "A Practical Guide to Steam Turbine Technology", McGraw-Hill, New York, pp. 216-218.
 9. R. K. Shah and D. P. Sekulic, 2003, "Fundamentals of Heat Exchanger Design", John Wiley & Sons, Inc., pp. 3-8.