초소형 유기랭킨사이클용 스크롤팽창기 효율 특성 분석

신동길[†]

한국기계연구원 그린동력연구실

(2012년 10월 15일 접수, 2012년 12월 8일 수정, 2012년 12월 8일 채택)

Analysis of Efficiencies of Scroll Expander for Micro Scale Organic Rankine cycle

Dong Gil Shin

Department of Engine Research, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received 15 October 2012, Revised 8 December 2012, Accepted 8 December 2012)

요 약

본 연구에서는 자동차용 엔진 폐열 회수 유기랭킨사이클에 적용하기 위해 개발 중인 스크롤 팽창기의 효율을 상용 스크롤 팽창기와 비교 분석을 수행하였다. 팽창기 효율 특성 시험을 위해 유기랭킨사이클을 운전하면서 팽창기 출력, 팽창기 입구 온도, 압력 및 작동유체(냉매 R134a)의 유량을 측정하였으며, 개발 중인 스크롤 팽창기의 전효율은 상용 스크롤 팽창기의 전효율에 비해 매우 낮은 수준을 나타내었다. 특히 팽창기 내부의 작동유체 누설에 의한 체적효율 저하가 전효율 저하에 큰 영향을 주는 것으로 파악되었기 때문에 향후 팽창기 효율 향상을 위해 팽창기 내부의 누설문제를 필히 해결해야할 것으로 분석되었다.

주요어 : 엔진 폐열, 유기 랭킨 사이클, 스크롤 팽창기, 전효율, 체적효율

Abstract -In this Study, efficiencies of the scroll expander under development for organic Rankine cycle using engine waste heat of vehicle have been analyzed and compared with the commercial scroll expander. While operating organic Rankine cycle for analysing expander efficiencies, power of expander, inlet temperature of expander, inlet pressure of expander and the flow rate of the working fluid(refrigerant R134a) have been measured. Overall efficiency of the expander has been shown the very low level compared with the overall efficiency of the commercial expander. Especially, because the low volumetric efficiency has much effect on overall efficiency, the working fluid leakage trouble of expander has to be solved surely for improvement of the expander overall efficiency.

Key words : Engine waste heat, organic Rankine cycle, Scroll expander, overall efficiency, volumetric efficiency.

1. 서 론

수 kW급 초소형 유기랭킨사이클은 태양열, 지열 등 신재생에너지 이용 발전 시스템과 산업활동에서 발생하는 각종 폐열 발전 등에 적용될 수 있어 다양한 분야의 에너지 절감에 매우 유용한 기술 중 하나

이다⁽¹⁾. 또한, 발전용 엔진이나 자동차 엔진에 초소형 랭킨사이클을 적용하여 에너지 효율을 증가시킬 수 있다. 최근 자동차 연비향상을 위해 엔진에서 발생한 폐열을 회수하여 동력으로 전환하는 랭킨 사이클에 대한 관심이 높아지고 있다⁽²⁾. 이론적으로 자동차 엔진 폐열을 랭킨사이클을 이용하여 동력으로 전환하면 약 10~15% 정도의 연비향상이 가능한 것으로 알려져 있으며, 독일 BMW, 일본 혼다, 미국 커민스(Cummins) 등 국외 자동차사 및 엔진제작사 뿐만 아

[†]To whom corresponding should be addressed.

Environmental and Energy Systems Research Division, KIMM
156, Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-343, Republic
of Korea
Tel : 042-868-7387 E-mail : sdk@kimm.re.kr

나라 국내에서도 자동차 엔진 폐열 이용 랭킨사이클을 개발하고 있다⁽³⁾. 랭킨사이클에서 팽창기는 작동유체의 열 및 압력에너지를 동력으로 변환하는 역할을 하는 랭킨사이클의 중요 핵심 구성품이며, 전체 사이클 효율에 가장 큰 영향을 미친다^{(4),(5)}. 랭킨사이클에 사용되는 팽창기는 여러 종류가 있으며, 크게 터빈방식(Turbine type)과 용적식(Positive displacement type)이 있다. 자동차 엔진에는 수천 rpm의 운전조건을 가지는 용적식 팽창기가 동력전달 측면에서 유리하다. 용적식 팽창기중에서 스크롤 팽창기는 구조나 효율면에서 우수하여 초소형 랭킨사이클용 팽창기로서 적합한 것으로 평가되고 있다^{(4),(5)}.

본 논문에서는 국내에서 개발 중인 승용차량 엔진 폐열 회수 랭킨사이클에 적용하기 위해 설계 제작된 스크롤 팽창기의 효율을 상용 스크롤 팽창기와 비교 분석을 수행하여 개발 중인 스크롤 팽창기의 효율 저하 문제점을 파악하였다.

2. 팽창기 효율 정의

팽창기 출력은 식(1)과 같다.

$$\dot{W}_{sh} = \eta_{mech} \eta_{is} \eta_v \dot{m}_{real} \Delta h = \eta_e \dot{m}_{real} \Delta h \quad (1)$$

여기서 $\dot{W}_{sh}$ 는 팽창기 축 출력, η_{mech} , η_v , η_{is} , η_e 는 각각 기계효율, 단열팽창효율, 체적효율 및 전효율을 나타내고, $\dot{m}_{real}$ 은 작동유체 실제 유량이며, Δh 는 팽창기 입출구 엔탈피 차이를 나타낸다.

체적효율은 식(2)와 같으며, 팽창기 내부에서 일어나는 작동유체의 누설정도를 나타내는 지표이다.

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{th}}{\dot{m}_{real}} \quad (2)$$

여기서 $\dot{m}_{th}$ 는 이론 질량이며 식(3)과 같다.

$$\dot{m}_{th} = \frac{\rho_{in} V_s N}{60} \quad (3)$$

여기서 V_s 는 행정체적이며, 팽창기 형상에 의해 결정되고 1회전당 팽창기 입구에 유입되는 작동유체

의 부피유량을 나타낸다. ρ_{in} 은 팽창기 입구 밀도, N 은 팽창기 회전수를 나타낸다.

마찰에 의한 동력 손실을 나타내기 위해 아래의 식(4)와 같이 기계효율과 단열팽창 효율의 곱인 마찰 특성 효율을 정의하였다.

$$\eta_f = \eta_{mech} \eta_{is} \quad (4)$$

팽창기 내부에서 단열팽창시 작동유체의 엔트로피 증가는 열손실과 마찰에 의해 발생하게 되는데, 팽창이 매우 짧은 시간에 일어나기 때문에 열손실량이 크지 않으며, 엔트로피 증가 요인은 마찰에 의한 부분이 크게 차지한다고 볼 수 있다. 따라서, 단열팽창 효율은 주로 팽창기 내부의 마찰력을 나타내는 지표라고 볼 수 있으므로, 마찰특성 효율 η_f 는 팽창기의 마찰특성을 나타내는 파라미터로 이용될 수 있다.

3. 팽창기 효율 측정 시스템 구성

스크롤 팽창기 효율 특성 시험을 위해 유기 랭킨사이클을 Fig. 1과 같이 증발기(Evaporator), 재생 열교환기(Regenerator), 팽창기(Expander), 응축기

Table. 1. 팽창기 제원

제원	상용 제품 (Model-1)	개발 제품 (Model-2)
팽창비(부피비)	4.05	1.859
행정체적(cc)	36.5	15.546

Fig. 1. 랭킨사이클 구성도

Fig. 2. 상용 스크롤 팽창기(Model-1)

Fig. 3. 랭킨사이클 구성도

(Condenser) 및 냉매 펌프(Pump) 등으로 구성된 랭킨사이클을 구축하였다. 작동유체는 냉매 R134a를 사용하였다.

재생기 및 증발기에서는 압축액 상태의 냉매에 열이 가해져 고온고압 증기상태로 변환되는 상변화가 일어난다. 팽창기에서는 과열증기 상태의 냉매가스가 팽창하여 엔탈피를 잃으면서 동력이 발생된다. 팽창기는 효율 특성을 비교 분석하기 위해 Table. 1과 같은 제원의 상용 제품과 개발 제품이 적용되었으며, 각각 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 동력계에 장착하였다.

상용 제품의 경우 상용 스크롤 공기 압축기 개조하여 제작하였다. 상용 스크롤 공기 압축기는 외부와의 누설방지 구조가 구비되어 있지 않기 때문에 냉매의 누설을 막기 위한 개조작업을 진행하였다.

4. 팽창기 효율 특성 실험결과

팽창기 입구온도가 100℃, 입구 압력이 30 bar인 조건에서 ORC 발전시스템 운전하면서 팽창기 회전수를 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm 으로 단계적으로 증가시키면서 팽창기 출력, 냉매유량 및 팽창기 입출구 온도, 압력 등을 측정하였다.

Fig. 4는 팽창기 전효율을 상용 제품(Model-1) 및 개발 제품(Model-2)의 전효율(η_e)을 각각 보여준다. 팽창기 회전수가 증가함에 따라 팽창기 전효율은 2가지 모델 모두 증가하는 경향을 보인다. 개발 제품의 전효율과 상용 제품의 전효율이 차이가 41~49%로서 매우 큰 것을 볼 수 있으며, 이는 사이클 열효율면에서도 큰 차이가 난다는 것을 의미한다. 개발 제품 전효율 저하의 요인을 파악하기 위해 전효율을 체적

Fig. 4. 팽창기 회전수 변화에 따른 전효율

Fig. 5. 팽창기 회전수 변화에 따른 체적효율

효율(η_v)과 마찰 특성 효율(η_f)로 분리하여 분석하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 팽창기 체적효율과 마찰 특성 효율을 각각 보여준다. 체적효율 차이는 47~53%로서 매우 큰 차이를 보이나 마찰 특성 효율 차이는 9% 수준으로서 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서, 팽창기 전효율의 특성에 체적효율 차이가 크게 기여하는 것

Fig. 6. 팽창기 회전수에 변화에 따른 마찰특성 효율

으로 나타났으며, 개발 제품의 효율 특성을 개선하기 위해서는 팽창기의 누설 문제 해결이 가장 중요한 것으로 파악되었다.

5. 결론

본 연구에서는 승용차량 엔진 폐열 회수 랭킨사이클에 적용하기 위해 설계 제작된 스크롤 팽창기의 효율을 상용 스크롤 팽창기와 비교 분석을 수행하였다. 팽창기 효율은 전효율, 체적효율, 기계효율 및 단열팽창 효율 등이 있으며, 설계 제작된 스크롤 팽창기의 전효율은 상용 스크롤 팽창기의 효율에 비해 매우 낮은 수준을 나타내었다. 특히 팽창기 내부의 작동유체 누설에 의한 체적효율 저하가 가장 큰 문제로 파악되었기 때문에 향후 팽창기 효율 향상을 위해 팽창기 내부의 누설문제를 필히 해결해야할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Quoilin S; Lemort V; Lebrun J. Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander, *Applied Energy*, 2010, 87, 1260-1268
2. Dolz V; Novella R; Garcia A; Sanchez J. HD Diesel engine equipped with a bottoming Rankine cycle as a waste heat recovery system. Part 1: Study and analysis of the waste heat recovery, *Applied Thermal Engineering*, 2012, 36, 269-278
3. Heo HS; Bae SJ. Technology trends of Rankine steam cycle for engine waste heat recovery, *Auto Journal of KSAE*, 2010, 32(5), 23-32
4. Lemort V; Quoilin S; Cuevas C; J. Lebrun, 2009,

Testing and modeling a scroll expander integrated into an Organic Rankine Cycle, *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29, 3094-3102.

5. Qiu G.; Liu H; Riffat S, Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle, *Applied Thermal Engineering*, 2011,31,3301-3307.