

공기구동 스크롤 팽창기 성능특성에 관한 실험적 연구

송원빈* · 곽철우* · 김태균* · 김주영* · 김광호*†

Experimental Study on Performance Characteristics of Air Driven Scroll Expander

Wonbin Song*, Chul Woo Kwak*, Tae Kyun Kim*, Ju Young Kim*, Kwang Ho Kim**†

Key Words : Pressure Difference(압력차), Rotational Speed(회전속도), Scroll Expander(스크롤 팽창기), Scroll Wrap Geometry(스크롤랩 형상)

ABSTRACT

The performance of a scroll expander is the most important factor for the efficiency of small scale Organic Rankine cycle waste heat power generation systems. In this research, a scroll compressor was purchased and operated in reverse to function as a scroll expander. With air as a working fluid, a series of performance test were conducted on this expander by varying the inlet and outlet pressure. Secondly, We have tested through 2000 to 3500 rpm rotational speed to find the maximum power and efficiency of the expander. And last, It was observed in the initial experiments that the design of the expander's orbiting scroll wrap partially blocked the fluid intake which may have caused unnecessary flow resistance. To verify this theory, a small part of the scroll wrap was removed and the performance test was redone. It was observed that the lower back pressure assure the higher efficiency and power of expander and the rotational speed that shows maximum adiabatic efficiency of scroll expander is 69% at 2500 rpm. And by modified wrap of the scroll, we could get volume flow rate for 13% to 19% and power for 5% to 18% increased. But the maximum efficiency of the modified scroll was decreased 8%.

1. 서 론

스크롤 형상의 유체기계는 먼저 냉동 공조 기기의 압축기로써 사용되기 시작하였다. 1905년에 Leon Creux가 스크롤 압축기의 개념을 고안하였으며, 랩이 갖는 인볼루트(Involute) 형상 가공의 기술적 문제로 1980년대에 상용화 되었다.

스크롤은 왕복동 팽창기에 비해 구동토크가 균일하며 팽창실이 선회, 고정 두 개의 스크롤만으로 이루어져 경량화 및 저소음을 구현하는데 유리하다. 또, 별도 밸브 없이 선회 스크롤-고정스크롤의 1쌍의 스크롤 내부에서 모든 흡입, 팽창, 토출 과정이 진행되는 단순한 구조를 갖기 때문에 입·출구에서 압력손실이 없으며, 부속품이 적어 제작이 간편하고 높은 신뢰성을 구현할 수 있는 장점이 있어 활용 잠재력이

매우 높다.

최근 이런 장점을 바탕으로 국내외에서 압축기에 사용되던 스크롤을 활용하여 팽창기로 사용한 사례가 있다. 스크롤 팽창기는 스크롤형상 압축기에 별도 추가 장치 없이 용도를 쉽게 전환 할 수 있다. 스크류, 로터리 형태의 압축기를 팽창기로 사용할 경우와 비교할 때, 스크롤은 일반적으로 1~10 kW 규모의 발전에서 가장 효율적이었으며 소형발전용 ORC에 적합한 범위이다.¹⁾

스크롤 팽창기 발전을 이용해 제품의 효율을 향상시킨 사례들이 있다. 일본의 시즈오카대에서 자동차 에어컨용 스크롤 압축기를 개조하여 공기를 작동 유체로 하는 스크롤 팽창기를 제작하였다. 그리고 0.6 kW의 출력과, 60~75%의 효율을 얻었다.²⁾ 또, 스크롤 팽창기를 저등급 폐열 회수용

* 한국과학기술연구원(Korea Institute of Science and Technology)

† 교신저자, E-mail : khkim@kist.re.kr

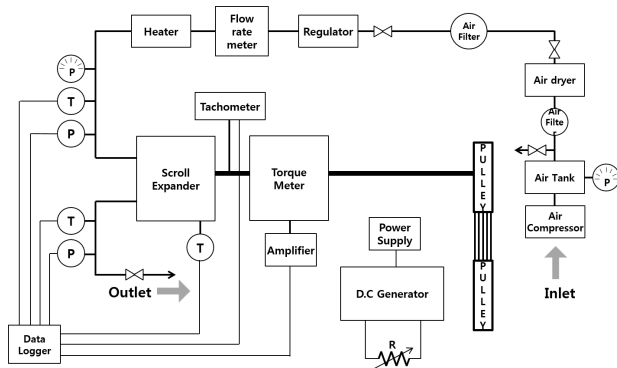


Fig. 1 Schematic representation of experiment

ORC에 적용한 사례가 있다. 스위스 연방 기술 연구소에서는 일반 공조용 스크롤 압축기를 개조하여 R134a를 작동유체로 하는 랭킨사이클에 적용하여 1~3.5 kW의 출력과 74%의 효율을 얻었다.³⁾ 국내에서는 바이오메스를 에너지원으로 하고 R134a를 냉매로 사용하는 2.9 kW 출력의 ORC를 설계하여 스크롤 팽창기 효율이 70.50%를 나타낸 바 있다.⁴⁾

팽창기는 열역학적 에너지를 기계적 에너지로 전환하는 장치로 ORC의 효율 향상에 가장 큰 영향을 미친다. 스크롤 팽창기를 포함한 ORC설계시 최대 효율을 구현할 수 있도록 하는 설계조건과 구조적 개선점을 찾기 위해, 본 연구에서는 세 가지 실험을 설계하고 각 실험 조건에서 스크롤 팽창기의 운전특성을 분석하였다. 첫째로, 압력차에 따른 운전 특성을 알아보기 위하여 입구압력을 변화 시키면서 측정하였다. 이때, 팽창시 배압(back pressure)의 영향을 알아보기 위하여 일정한 입구 압력 하에서 출구압력을 조절하면서 팽창기 운전 특성을 측정하였다. 이 조건은 실제 ORC 회로를 구성할 때, 응축기의 영향으로 출구압력이 대기압 보다 낮게 내려가지 못하게 되는데, 이것이 팽창기에 미치는 영향을 고려하기 위함이다. 둘째로, 스크롤의 회전속도에 따른 출력값의 변화를 확인하여 최적 운전속도를 확인하여, 운전속도에 따른 팽창기의 효율변화와 최적운전조건을 제시하고자 한다. 마지막으로, 스크롤의 초기 랩 형상을 절삭하여 변형시켜 유입에 방해가 되는 경우를 실험하였다. 이 실험에서 형상에 변화를 주는 것은 압축기를 팽창기로 전환하는 과정에서 효율 저해요소를 수정해 효율 극대화를 위함이다. 압축기의 출구가 팽창기의 입구가 되어 압축기에서는 발생하지 않던 유입단면을 줄어든게 하는 현상이 생기기 때문이다.

2. 실험 설계 및 방법

2.1 실험장치 구성

실험장치의 구성은 Fig. 1과 같다. 스크롤의 작동유체는 공기로 하고, 한신 GRH-35A 스크롤 압축기를 이용하여 절

Table 1 Specifications of sensors

종류	제조사	분류	오차범위 (F.S.)
유량계	OVAL	코리올리	0~0.5%
압력센서	Synsys	스트레인	0~0.054%
온도센서	준경계전	T-type T.C	-1~1%
토크 트랜스듀서	CTAplus	스트레인	0~0.3%
Tachometer	Autonics	광센서	-0.01~0.01%

대압력 8.2 bar의 압력으로 토출되며 바로 축압기(Air tank)로 보내진다. 500 L 축압기를 사용하여 상대적으로 매초 2L 이하의 압축공기를 사용하는 실험 조건에서 일정한 압력을 사용할 수 있도록 한다. 축압기에서 건조기를 지나며 건조공기(Dry air)를 만든다. 그리고 필터를 지나면 볼 밸브와 레귤레이터가 연결되어있다. 이 볼 밸브로 팽창기에 유입되는 공기의 유량과 압력을 조정한다. 유량과 압력을 독립적으로 조절하는 것은 불가능하다. 이어 코리올리형 유량계(OVAL)를 이용하여 관을 통과하는 분당 공기의 질량을 측정하고 히터를 통해 공기를 고온상태, 94°C가 되도록 조절한다. 고온, 고압의 공기가 팽창기로 유입되기 직전의 위치에 압력 센서(Synsys), T-타입 열전대를 배치하여 최종 입구 기체 상태를 측정한다. 출구에서도 팽창기를 거친 직후의 공기 압력과, 온도를 같은 센서를 이용하여 측정한다. 팽창기 출구로 토출된 공기는 볼 밸브를 거쳐 대기 중으로 방출된다. 팽창기 출구의 볼 밸브 역시 출구압력을 조절할 때 사용된다. 고온고압의 공기가 팽창기를 통과하면서 에너지가 변환되는 과정에서 회전축을 통해 발생된 팽창기의 축 동력은 토크 트랜스듀서(CTAplus)와 타코미터(Tachometer) (Autonics)를 이용하여 측정된다. 측정 장비의 자세한 사양은 Table 1에 명시되어있다.

축에 연결된 풀리는 DC모터(명성전기)에 연결되어 모터를 회전시킨다. 이 모터는 전력에 의해 작동되는 일반적인 DC 모터이지만, 본 실험에서는 발전기로 이용하였다. 팽창기의 출력은 DC발전기를 통해 전류를 발생시키고, 가변저항에서 열로 방출된다. 가변저항을 이용하여 팽창기에 부하(Load)를 만들어주고, 토크와 회전수를 조절할 수 있도록 한다.

팽창기 센서에서 수집된 정보는 Data acquisition device (Agilent 34970A)를 통해 매 500 ms 간격마다 기록되며 컴퓨터로 데이터를 전송한다. 이 수집된 데이터를 바탕으로 Reprop(NIST)을 이용하여 각 순간의 기체 상태, 엔탈피, 엔트로피, 밀도 정보를 얻을 수 있다.

2.2 실험방법

2.2.1 입·출구압력 조절

본 실험 장치에서 구현 가능한 입구압력과 출구압력의 범

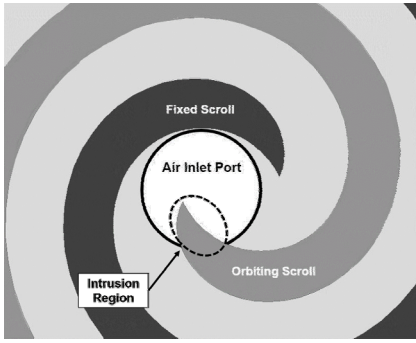


Fig. 2 Disturbance of air at the entrance by the wrap

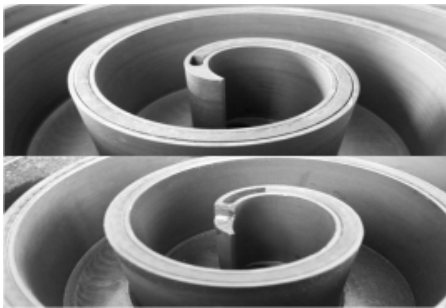


Fig. 3 Cutting at the starting edge of wrap. original scroll (up), modified scroll (down)

위는 각각 최소 대기압부터 최대 8.2 bar이다. 따라서 입·출구 압력차이 ΔP 는 최대 7.2 bar이며 최소 0이다. 본 논문에서는 스크롤 기계의 효율특성상 사용이 고려되지 않는 범위를 배제하고 고효율 구간이며 효율의 경향성이 변하는 부분을 살펴보기 위해 $\Delta P=3.5$ bar 이상 $\Delta P=7.2$ bar 이하 구간을 실험대상으로 설정한다. 위 조건에서 두 가지 실험을 하여 비교한다. 첫 번째 실험은 출구 밸브를 완전 개방하여 출구압력을 대기압과 같게 하고, 입구 압력을 조절하여 입·출구 압력차이에 따른 팽창기 출력을 측정하는 실험이다. 두 번째 실험은 입구 밸브를 완전히 개방하여 입구압력이 8.2 bar인 상태에서 출구압력을 조절하여 압력차이에 따른 팽창기 출력을 측정하는 실험이다. 두 실험 모두 회전속도는 항상 2000 rpm으로 일정한 상태에서 실험을 수행하였다.

2.2.2 회전속도 조절

스크롤 팽창기의 회전속도에 따른 운전특성과 최적운용 지점을 알아보기 위해 회전속도 2000, 2500, 3000, 3500 rpm에서 실험을 각각 시행하였다. 출구압력은 1 bar 고정, 입구압력은 각 목표 회전속도를 만드는 8.2 bar 이하의 압력을 유지한다. 이때, 입·출구 압력 차이에 따른 출력과 단열 효율을 비교했다.

2.2.3 스크롤 랩 형상 개선

압축기로 설계된 스크롤 기계를 팽창기로 사용할 때 공기의 흐름은 압축기에서의 방향과 반대가 된다. 변화된 흐름에

서 압축기에는 없었던 공기흐름을 방해하는 요소를 갖게 되는 셈이다. 스크롤 랩이 시작되는 중심부는 압축기로 사용할 때 배기구로 사용되어 공기를 내보내는 부분이지만, 팽창기의 경우 공기가 유입되는 곳이다. Fig. 2과 같이 스크롤이 회전할 때 유입구의 단면적을 가리는 구조가 유입량에 영향을 미칠 수 있다.

일반적으로 유량은 출력과 효율에 큰 영향을 미치는 요소이기 때문에, 유량의 방해요소로 추측되는 초기 랩 부분을 절삭하여 모든 선회각에서 입구를 가리지 않도록 가공된 스크롤을 만들었다. Fig. 3은 스크롤 압축기로 사용되던 원형을 유지한 스크롤(위)과 유입구 단면적과 겹치지 않도록 초기 랩을 깎은 스크롤(아래)과 비교사진이다. 초기 스크롤 랩 끝부분의 높이를 낮춤으로써 유입구 단면과 겹치지 않도록 만들었다.

이 스크롤을 실험 대상으로 입구 압력을 조절하여 입·출구 압력차이에 따른 성능을 측정한다. 회전속도는 2000 rpm으로 고정하고, 스크롤 형상 변경에 따른 출력 변화를 분석한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 결과

스크롤 팽창기로부터 발생하는 축 출력은 토크 트랜스듀서와 타코미터를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$W = \tau \times \omega \tag{1}$$

W 는 스크롤 팽창기의 축 출력, ω 는 축 각속도, τ 는 토크를 나타낸다. 그리고 공기의 팽창과정에서 외부와 열전달이 없도록 가정한 팽창기의 단열효율 η_{exp} 은 측정 값을 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\eta_{exp} = \frac{W}{\dot{m}(h_{inlet} - h_{outlet,s})} = \frac{W}{\dot{m}\Delta h_s} \tag{2}$$

\dot{m} 는 건조공기의 유량, h_{inlet} 은 입구에서 공기의 엔탈피 측정값 $h_{outlet,s}$ 는 REFPROP을 통해 얻은 등엔트로피 변화 후 엔탈피 값이다. 팽창기를 거친 전·후 엔탈피 차이 $h_{inlet} - h_{outlet,s}$ 는 엔탈피 차 Δh_s 로 나타낼 수 있다.

3.2 결과 고찰

3.2.1 입·출구압력 조절

이 실험에서 팽창기의 출력은 회전수가 고정되어 있기 때문에, 토크에 의해 결정된다. 출력은 동일한 압력 차이에서 출구압력이 낮을 때 더 높은 값을 보이는 것을 확인할 수 있

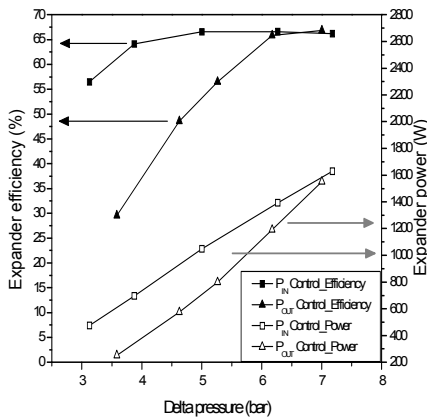


Fig. 4 Effects of Pressure difference on expander efficiency and power

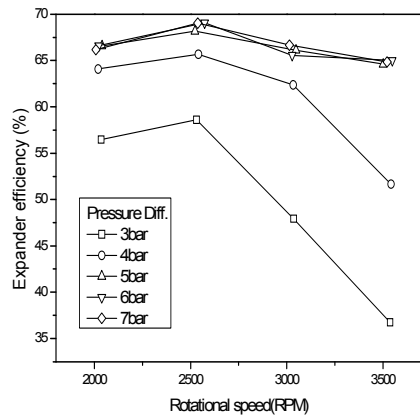


Fig. 6 Effects of pressure difference and rotational speed on expander efficiency

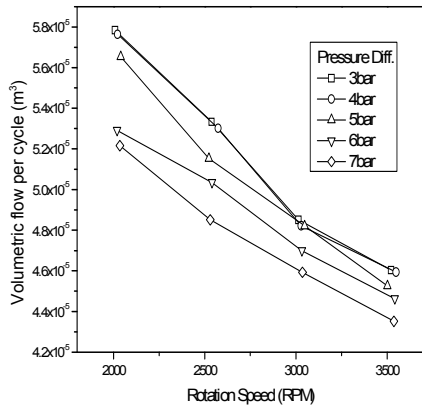


Fig. 5 Effects of pressure difference and rotational speed on volumetric flow per cycle

다. Fig. 4에서 좌측 수직축과 검은 점으로 그려진 그래프는 팽창기 효율을, 우측 수직축과 흰점으로 그려진 그래프는 팽창기 출력을 나타낸다.

출구 배압이 존재하는 경우, 압력이 가장 낮은 최외각 팽창실도 대기압보다 높은 압력을 갖게 된다. 누설은 압력차의 제공근에 비례하게 발생하기 때문에, 스크롤로부터 외부로 더 큰 누설이 발생한다. 따라서, 스크롤에 의해 전환되는 축 회전 출력이 그래프와 같이 감소하게 된다. 압력차 3.5 bar 에서 두 실험간 출력차이가 가장 크게 나타났다. 이때, 출력의 차이는 255 W로 배압이 존재 할 때, 그렇지 않은 경우보다 62% 출력이 감소되었다. 출력 손실은 압력차이가 가장 낮은 지점에서 최대를 나타내었고, 배압이 대기압에 근접할 수록 출력의 격차가 줄어들었다. 출구압력이 높은 조건에서 팽창기는 출구 환경이 대기압일 경우 보다 최고 단열효율이 감소한다.⁵⁾

또, 5 bar 이상의 압력차에서는 입·출구 압력차가 더 증가하여도 효율은 더 높아지지 않는 상한효율을 갖게 된다. 이것은 스크롤 랩 고유 형상에 따른 것으로, 다음 '3.2.3 스크롤 랩 형상 개선' 실험에서 확인할 수 있다.

3.2.2 회전속도 조절

회전속도가 증가할 때, 팽창기는 회전속도가 증가하면서 유량이 비례하여 증가한다. 따라서, 팽창기의 출력도 증가하게 된다.

입·출구 공기의 엔탈피 변화 Δh_s 는, 스크롤의 형태는 회전속도에 관계없이 일정하기 때문에 회전속도에 무관하게 스크롤 입·출구의 압력 비에 의해 결정된다. 실험 결과와 비교할 때, 회전속도에 따른 엔탈피 변화량은 최대값의 3% 이내의 오차를 보였다.

이론적으로 용적형 유체기계인 팽창기의 1회전 당 유입되는 기체의 부피는 일정하다. 따라서, 분당 회전수에 대한 팽창기 체적유량의 비율을 통해 1회전 누설로 인해 늘어난 체적 유량을 알 수 있다. Fig. 5에서 높은 회전수에서, 행정 마다 누설 공기량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 일정간격을 갖는 스크롤 랩이 빠른 속도로 이동 할수록 공기의 상대속도가 줄어들어 간극을 통과하는 공기 누설이 줄어드는 것을 알 수 있다. 따라서 회전속도를 높이는 것은 누설을 낮추는 효과를 만들며, 효율을 높이는 요인이 된다. 실험속도 범위, 3500 rpm 이하에서는 이런 경향성이 지켜졌으며, 회전속도가 높아져 누설이 적어지고 효율이 향상되는 요인으로 작용한다.

스크롤 압축기의 선회 스크롤에는 축을 중심으로 선회하며 각변위(Angular Displacement)가 생기지 않도록 하는 올댐링과 중심축을 지지하는 베어링이 있다. 올댐링과 베어링에서의 마찰손실은 회전속도가 증가함에 따라서 증가한다. 이에 따른 기계적 에너지 손실이 각속도가 빨라짐에 따라 증가하게 된다.

Fig. 6 그래프에서 출구가 대기압 일때, 회전속도에 따른 두 개의 상반된 경향성에 의해 효율의 최대 값이 존재하는 회전속도가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 그래프는 입·출구 압력차 범위가 3~7 bar이고 출구압력이 대기압 일 때, 각 회전속도별 효율의 변화를 나타낸다. 위에서 언급한 회전

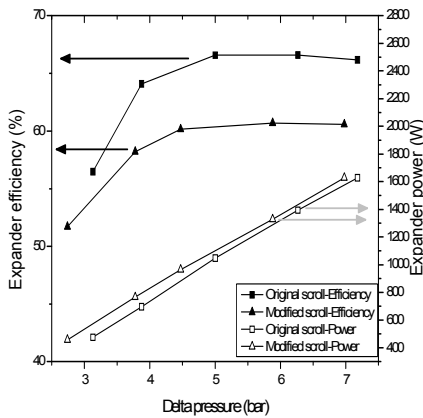


Fig. 7 Effects of pressure difference and the scroll wrap on expander efficiency

수 증가에 의한 효율 향상보다 회전마찰에 의한 효율 감소가 더 우세하게 작용하기 시작하는 지점이 2500 rpm이고, Fig. 6에서 그래프의 증감이 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 본 실험에서 2500 rpm에서 최대효율에 이른다.

3.2.3 스크롤 랩 형상 개선

Fig. 7은 압력 차이에 따른 두 스크롤의 단일효율과 출력을 보여주는 그래프다. 두 스크롤 중 하나는 공기압축기 원형을 바로 팽창기로 사용한 스크롤이고, 다른 하나는 흡입구 단면을 침범하는 초기 스크롤 랩(Wrap) 일부를 절삭한 스크롤이다. 실험 결과, 초기 랩을 절삭한 스크롤의 경우 입·출구 압력차이 ΔP 가 3.2 bar일 때, 7 bar일 때, 각각 원형 스크롤 대비 19%, 13% 유량이 증가하였다. 3.2 bar와 7 bar 사이에서 압력차이가 증가함에 따라 두 스크롤 간 유량차이는 선형적으로 줄어들었다. 실험 설계 시 공기 유입구 부분의 스크롤이 유량에 영향을 준다는 가정이 유효하였다. 그리고, 유량이 증가하는 것이 출력에 영향을 주어 $\Delta P=3.2$ bar에서 122 W, $\Delta P=7$ bar에서 82 W 만큼 출력이 늘어났다. 이것은 원형스크롤 대비 각각 18%, 5% 증가한 출력이다. 낮은 압력에서 차이에 더 민감하게 유량, 출력이 증가했다. 출력 또한 압력차가 증가하면서 선형적으로 두 스크롤 간 출력차이가 줄어들었다.

가공된 스크롤과 원형 스크롤을 비교할 때, 유량의 증가량이 축 출력의 증가량보다 더 우세하고, 증가된 유량에 의한 누설의 증가로 인해 가공된 스크롤이 더 낮은 효율을 갖게 된다. 최대 효율이 60%로 가공 전 스크롤에 비해 8% 감소하였다.

그래프에서 두 스크롤의 상한 효율을 갖게 하는 입·출구 압력차의 범위가 다른 것을 관찰 할 수 있다. 개선된 스크롤의 경우 그 범위가 4.5 bar에서 시작되어 그 보다 높은 압력차를 포함한다. 스크롤의 입구를 가공했을때, 가공된 틈새로 공기가 이동하기 때문에, 팽창을 시작하는 첫 폐쇄된 팽창실 생성시점이 지연되기 때문이다. 대기압 출구로 공기가 방출되는 시점은 같고 최초 팽창실 생성 시점이 팽창 구간을 결

정한다. 스크롤 랩 형상이 깎여 팽창 구간이 변하고, 팽창기에서 팽창할 수 있는 최대 압력차가 정해진다. 따라서, 초기 스크롤이 가공된 팽창기는 최대 압력차가 원형보다 작고, 더 낮은 압력차에서 최대효율을 보인다.

4. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 출구에 배압이 존재할 때, 최외각 팽창실에서 발생하는 누설의 증가로 인해 출력이 낮아지고 효율성이 저하된다. 따라서, 팽창기 이후 이어지는 회로구성에 의해 형성되는 압력이 대기압과 같을 때 팽창기는 효율적으로 운용된다.
- 2) 누설과 기계적 마찰에 의한 영향을 받기 때문에, 본 스크롤 팽창기는 2500 rpm의 회전수에서 최대 효율을 갖게되며, 입·출구 압력차가 5 bar 이상 일 때, 최대 효율 69%를 갖는다.
- 3) 스크롤 랩이 스크롤 팽창기의 유입구와 겹치지 않도록 랩 일부를 절삭하면 스크롤에 유입되는 공기량이 증가되고, 출력이 증가한다. 하지만, 스크롤의 단일효율은 낮아진다.
- 4) 입·출구 압력차이가 스크롤 형상에 의해 정해지는 최대 팽창시 압력차보다 커져도 효율은 증가하지 않고 일정해진다. 회전속도 2000 rpm에서, 원형스크롤은 5 bar, 변형스크롤은 4.5 bar 이상의 압력차에서 효율이 65%, 60%로 일정하다.

References

- (1) Qiu, G., Liu, H., and Riffat, S., 2011, "Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle," Applied Thermal Engineering, Vol. 31, No. 16, pp. 3301~3307.
- (2) Yanagisawa, T., Fukuta, M., OGI, Y., and Hikichi, T., 2001, "Performance of an oil-free scroll-type air expander" Proc. of the ImechE Conf. Trans. on compressors and their systems. No. C591/027, pp. 167~174"
- (3) Zanelli, R. and Favrat, D., 1994, "Experimental Investigation of a Hermetic Scroll Expander-Generator," Proc. Of Intern. Comp. Eng. Conf., 459~464.
- (4) Moon, J. H., Yu, J. S., Kim, H. J., and Cho, N. J., 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. 30~35.
- (5) Woo, J. H., Park, T. O., Song, W. B., and K. H. Kim, 2014, "Experimental Study on the Scroll Expander Performance Characteristics," Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 298~299.