

가열구조를 갖는 스크롤 팽창기와 이를 이용한 분산발전 시스템

김영민* · 신동길 · 이장희

Scroll Expander with Heating Structure and Their Systems for Distributed Power Source

Young Min Kim*, Dong Kil Shin, Jang Hee Lee

Key Words : Scroll Expander(스크롤 팽창기), Scroll Compressor(스크롤 압축기), Rankine Cycle(랭킨사이클), Ericsson Cycle(에릭슨 사이클), Thermal Efficiency(열효율)

ABSTRACT

Scroll compressor has been used extensively for refrigeration since the early 1980's for its improved efficiency, greater reliability, smoother operation, lower noise and vibration. And also, nowadays, the scroll mechanism is used for expander even though in niche market yet. But scroll expander has not been used for high-temperature and high-pressure gas, because the continuous expansion of the gas causes a wide range of temperature distribution over the whole scroll wrap that leads to differential thermal expansion of scroll elements, which results in system vibrations, noise and efficiency losses. For the scroll expander to produce power more efficiently, all of radial and axial clearances between scroll wrap must be the same. In order to reduce differential thermal expansion in addition to improvements in thermal efficiency and specific power, we propose a scroll expander with heating structure. Heat-pipe heating structure is considered as the most effective method to heat the scroll expander at a uniform temperature. This paper includes some results of preliminary study of the scroll expander with heating structure and proposals of their systems for power generation and refrigeration.

1. 서론

최근 선진국의 몇몇 회사에서 가정용 열병합 발전용 구동기로서 스크롤 팽창기를 이용한 랭킨사이클을 상용화하려는 노력이 진행되고 있다. 랭킨사이클 및 스텔링 엔진을 포함한 외연기관은 연료의 다중성, 배기가스의 청정함, 저소음, 저진동, 오랜 수명, 유지보수의 간편함 등 많은 장점을 가지고 있기 때문에 특히 열병합 발전용 구동기로서 내연기관에 비해 많은 장

점을 가지고 있어 상용화하려는 노력이 진행되고 있다. 분산형 열병합 발전은 열과 전기를 동시에 사용하고 송전손실이 없기 때문에 탁월한 에너지 절감효과가 있어 기후변화협약에 대처할 수 있는 가장 중요한 수단으로서, 스텔링 엔진 및 랭킨사이클 엔진을 포함한 외연기관은 3kW이하의 가정용 초소형 열병합 발전용 구동기로서 향후 전력시장에 커다란 변화를 가져올 것으로 기대되고 있다. 그러나 현재 랭킨사이클 엔진에 사용되고 있는 스크롤 팽창기는 여러 가지 기술적인 문제로 인하여 비교적 저온영역에서 사용되고 있기 때문에 열효율이 낮으며 좀 더 경쟁력을 가지기 위해서

* 한국기계연구원 엔진환경기계그룹
Tel: +82-42-868-7377
E-mail : ymkim@kimm.re.kr

는 고효율의 고온 고압용 스크롤 팽창기를 개발할 필요성이 있다고 할 수 있다. 본 논문은 기존 스크롤 팽창기의 가장 큰 문제점인 열변형 문제를 해결하기 위한 가열구조를 갖는 스크롤 팽창기와 이를 이용한 시스템들을 제시하고 스크롤 팽창기의 가열에 따른 효과를 살펴보고자 한다.

2. 가열구조를 갖는 스크롤 팽창기

2.1. 기존 스크롤 팽창기의 문제점

지금까지 열기관용 스크롤 팽창기에 관한 연구를 살펴보면 대부분 터빈과 같이 고온 고압의 연소가스 또는 증기를 스크롤 팽창기의 중심부로 공급하여 동력을 발생시키고 있다. 스크롤 팽창기에서 효율적으로 동력을 얻기 위해서는 Fig. 1과 같이 팽창기내 각 밀폐공간(1, 2, ……)이 모두 효과적으로 실링이 되어야 한다. 축방향 실링을 위해서는 랩높이가 일정해야 하고 반경방향 실링을 위해서는 각 밀폐공간을 형성하는 스크롤랩 간격이 모두 일정해야 하며 이 간격이 선회 스크롤랩의 회전직경과 일치해야 한다. 그러나 고온 고압의 작동유체로 운전 중인 스크롤 팽창기내에서는 작동유체의 연속적인 팽창에 의해 스크롤 팽창기의 중심부의 온도가 높고 주변부의 온도가 낮은 온도구배가 심하게 발생되기 때문에 중심부와 주변부의 열변형의 차이로 인해 스크롤랩 간격(반경방향)과 스크롤랩 높이(축방향)가 달라져 마찰, 진동, 누설이 증가하여 급격하게 효율이 감소하게 된다. 현재 선진국의 경우도 고온의 작동유체를 사용하는 스크롤 팽창기를 성공적으로 개발한 사례는 아직 보고되고 있지 않다. 최근 발표되고 있는 가정용 열병합 발전용 랭킨사이클 엔진의 경우 스크롤 팽창기는 비교적 저온영역인 200℃~300℃에서 사용되고 있으며 열효율은 약 10% 정도인 것으로 알려져 있다. 스크롤 팽창기를 이용한 발전시스템의 발전효율을 더욱 향상시키기 위해서는 고온의 작동유체를 사용할 수 있는 스크롤 팽창기의 개발과 이를 이용한 고효율 시스템을 개발할 필요성이 있다고 할 수 있다.

2.2. 가열구조를 갖는 스크롤 팽창기

개발하고자 하는 스크롤 팽창기는 기존 스크롤 팽창기의 중심부와 주변부의 온도구배에 의한 열변형 문

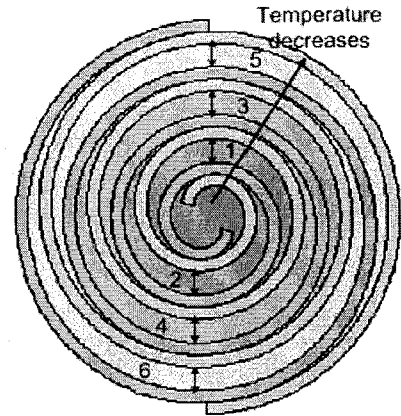


Fig. 1 Temperature drop in scroll expander

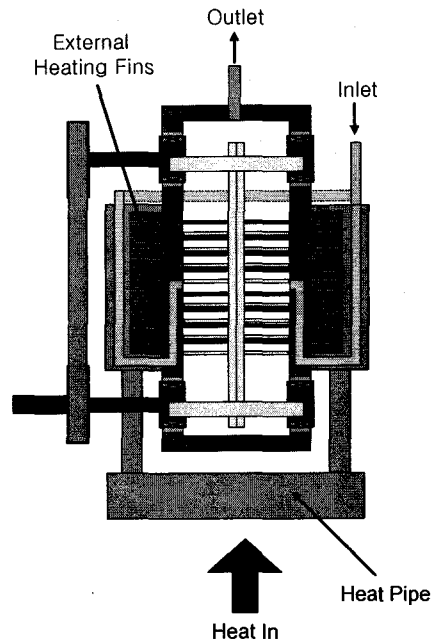


Fig. 2 Scroll expander with heating structure

제를 해결하기 위하여 Fig. 2와 같이 스크롤 팽창기 외부에 균일한 온도로 가열할 수 있는 구조를 가지고 있다. 제시된 스크롤 팽창기의 경우 작동가스가 스크롤 팽창기내에서 팽창하면서 스크롤랩에 의해 계속해서 재열되어 온도가 떨어지지 않기 때문에, 온도구배가 줄어들고 동시에 작동가스의 재열과정에 의해 시스템의 출력과 열효율을 증가시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 스크롤 팽창기를 균일한 온도로 가열하기 위

해서는 외부열원에 의한 직접가열 방식보다는 스크롤 팽창기 외부에 히트파이프 원리를 이용한 구조로 간접가열하는 방식이 더욱 효과적일 것으로 생각된다. 히트파이프는 밀폐된 공간을 진공배기한 후 상변화 물질을 주입하여 열을 받는 가열부에서 끓고 열을 주는 피가열부에서는 응축되므로 빠른 열전달과 거의 균일한 온도로 가열하기 위한 가장 효과적인 열전달구조라고 할 수 있다.

3. 제시된 스크롤 팽창기를 이용한 시스템

3.1. 재열-재생 랭킨 사이클

현재 랭킨(증기)사이클에서 가장 잘 알려진 팽창기는 증기터빈으로서, 제시된 가열구조를 가진 랭킨사이클을 기존 증기터빈 사이클과 비교하여 장점을 살펴보면 다음과 같다.

증기터빈을 이용한 랭킨사이클에서 효율을 향상시키기 위한 방안으로 Fig. 3과 같이 팽창과정에 있는 증기를 전량 터빈 밖으로 추출하여 재열기로 가열한 다음 다시 터빈으로 보내서 출구압력까지 팽창시키는 재열사이클과 Fig. 4와 같이 터빈의 팽창과정 도중에서 일부 증기를 추출하여 급수를 가열하는 재생사이클이 사용되고 있다. 열효율 향상을 위해서는 재열단수와 재생을 위한 추기단수를 증가시키는 것이 이상적이지만, 실제에 있어서는 장치가 복잡해지고 설비비가 증가되는 문제가 있다.

그러나 Fig. 5와 같은 가열구조를 갖는 스크롤 팽창기를 이용한 랭킨사이클에서는 작동유체가 팽창기내에서 팽창과 동시에 넓은 스크롤 랩을 통해 연속적으로 재열이 되고 팽창 후 고온의 작동유체의 열은 재생열교환기를 통해 급수를 가열하는데 사용하기 때문에 추가적인 장치의 복잡함이 없이 고효율의 재생-재열 랭킨사이클을 실현할 수 있다. 그러나 이러한 재생-재열 랭킨사이클은 저온영역(200°C~300°C)에서는 효율향상 효과가 크지 않으며, 고온영역으로 갈수록 효율향상 효과가 커진다고 할 수 있다.

3.2. 스크롤 타입 에릭슨 사이클 엔진

제시된 가열구조를 갖는 스크롤 팽창기는 상변화를 동반하는 증기사이클 뿐 만 아니라 상변화를 동반하지 않는 가스사이클에도 적용할 수 있으며 대표적인 가스

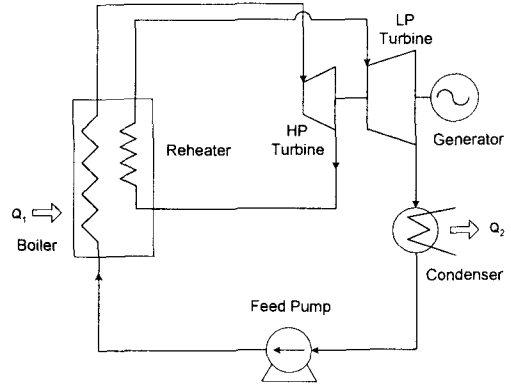


Fig. 3 Two-stage reheat Rankine cycle

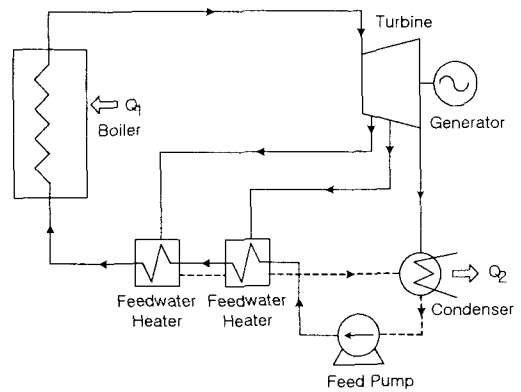


Fig. 4 Two-stage regenerative Rankine cycle

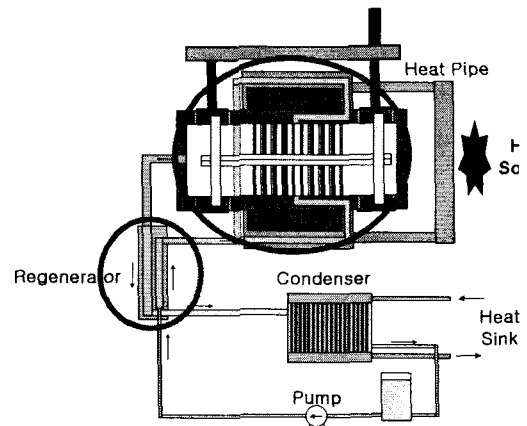


Fig. 5 Reheat and Regenerative Rankine cycle

사이클인 브레이튼 사이클과 비교해 보면 다음과 같은 장점이 있다. 터보형 기기를 이용한 브레이튼 사이클의 경우 열효율 향상을 위해 압축과 팽창을 Fig. 6과

같이 다단으로 하여 중간냉각 및 재열을 하며, 압축 및 팽창단수를 증가시킬수록 중간냉각, 재열 및 재생 사이클의 브레이튼 사이클은 등은 압축/팽창의 에릭슨 사이클에 가깝게 되어 효율이 카르노 사이클에 접근하지만 장치구성이 복잡해져 실제 구현에는 어려움이 있다. 그러나 스크롤기는 터보형기와 같이 압축과 팽창이 연속적이면서 밀폐된 공간의 체적변화에 의한 용적형기로서 왕복동기보다 작동가스와 접하는 전열면적이 스크롤 랩에 의해 훨씬 넓어 압축/팽창과정에서 효과적으로 냉각/가열을 할 수가 있기 때문에, 본문에서는 이러한 특성을 이용하여 Fig. 7과 같이 스크롤기를 적용한 새로운 에릭슨 사이클 엔진을 제시하고자 한다. 스크롤기를 적용한 새로운 에릭슨 사이클 엔진은 한 쌍의 스크롤 압축기와 스크롤 팽창기로 구성되어 있으며, 압축시 발생하는 열은 압축공간 내의 스크롤 랩과 외부의 냉각편을 통해 압축기둘레의 저열원으로 방출되며 압축된 작동유체는 스크롤 팽창기로 이동되어 팽창이 이루어진다. 팽창시 팽창기둘레의 고열원으로부터 가열편과 팽창공간 내의 스크롤 랩을 통해 계속해서 열이 공급된다. 팽창된 작동유체는 다시 스크롤 압축기로 공급되어 사이클을 이루게 되며 효율향상을 위해 압축기에서 팽창기로 이동되는 저온의 작동유체와 팽창기에서 압축기로 공급되는 고온의 작동유체 사이에 열교환기를 통해 재생 열교환이 이루어지도록 구성된다. 그러나 스크롤기를 적용한 에릭슨 사이클 엔진에서도 압축/팽창과정이 완벽하게 등은 과정은 아니기 때문에 별도의 히터와 쿨러를 필요로 하며, 압축/팽창과정에서 냉각/가열이 잘 이루어질수록 별도의 히터와 쿨러의 크기와 이를 통한 열출입량이 작아지게 되며 브레이튼 사이클보다는 에릭슨 사이클에 가깝게 된다. 에릭슨 사이클과 브레이튼 사이클의 비교를 위해 Fig. 8과 같이 P-V선도를 비교해보면 주어진 온도, 압력 범위에서 단일 압축/팽창과정이 등은 압축/팽창과정으로 대체됨으로써 빗금친 면적 1-2-5의 압축일 감소와 3-4-6의 팽창일 증가를 가져오게 되며 열효율 및 비출력의 향상을 가져오게 된다.

3.3. 스크롤 타입 역 에릭슨 사이클 냉동기

에릭슨 사이클의 역과정은 역 브레이튼 사이클과 마찬가지로 외부에서 동력이 투입되고 팽창부의 온도

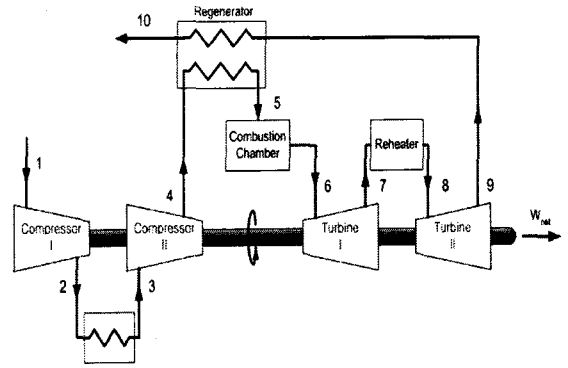


Fig. 6 Two-stage compression & expansion with intercooling, reheating and regeneration

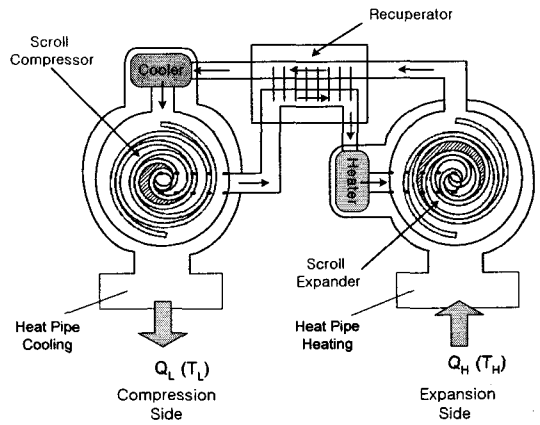


Fig. 7 Scroll-type Ericsson cycle for heat engine

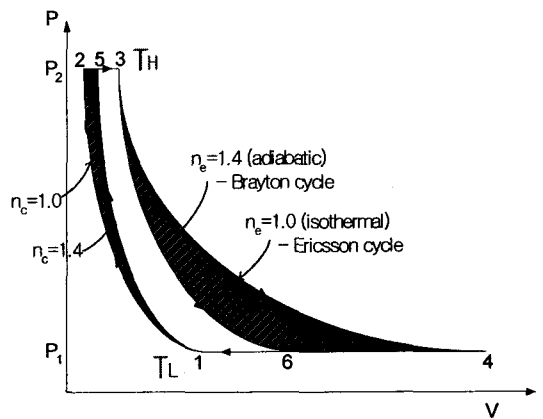


Fig. 8 Brayton cycle & Ericsson cycle (P-V diagram)

가 압축부의 온도보다 낮은 경우 냉동사이클로 작동하게 된다. 이상적으로 역 에릭슨 사이클은 압축/팽창과정이 등온과정이며 역 브레이튼 사이클은 압축/팽창과정이 단열과정으로서, Fig. 9에서 제시된 스크롤 타입 역 에릭슨 사이클에서 압축/팽창과정에서 열교환량이 잘 이루어지고 쿨러부와 히터부에서 열교환량이 줄어들수록 역 브레이튼 사이클 보다는 역 에릭슨 사이클에 가까워지게 된다. 두 사이클의 비교를 위해 Fig. 10의 P-V선도를 보면 주어진 온도와 압력 범위에서 단열 압축/팽창과정이 등온 압축/팽창과정으로 대체됨으로써 빗금친 면적 1-2-5의 압축일 감소와 3-4-6의 팽창일 증가를 가져오게 되어 빗금친 총면적만큼 소요동력이 감소하는 반면 냉각용량은 증가하게 되어 COP가 증가하게 된다.

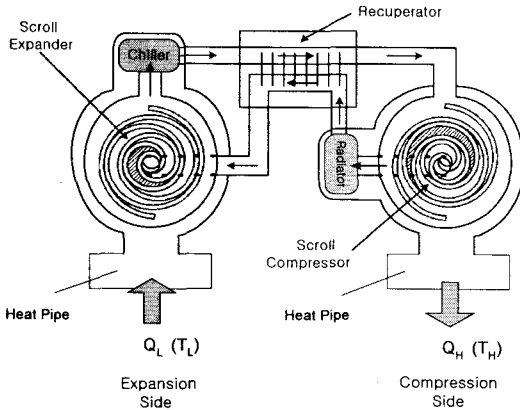


Fig. 9 Scroll-type reversed Ericsson cycle for refrigerator

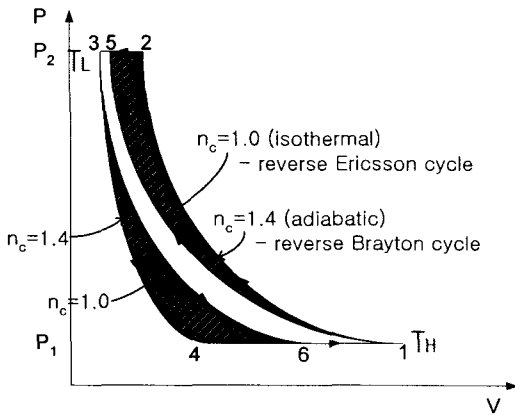


Fig. 10 Reversed Ericsson cycle & Brayton cycle

3.4. 랭킨사이클과 에릭슨 사이클 엔진 비교

가열구조를 갖는 스크롤 팽창기는 상변화를 동반하는 랭킨사이클과 상변화를 동반하지 않는 에릭슨 사이클 두 가지 시스템에 적용될 수 있으며 그 특징을 비교하면 Table. 1과 같이 요약될 수 있다. 먼저 랭킨 사이클은 작동유체를 액상으로 압축을 하고 상변화를 통해 큰 부피변화가 얻기 때문에 Back Work Ratio 즉 팽창일에 대한 압축일의 비율이 매우 작지만 (수%), 에릭슨 사이클의 경우 가스상으로 압축을 하고 이를 가열하면서 온도변화로 부피변화를 가져오기 때문에 압축과 팽창시의 온도비에 따라서 팽창일에 대한 압축일의 비율이 달라지게 된다. 예를 들어, 저온을 동일한 온도 50℃로 가정하고 고온이 200℃일 경우에는 팽창일에 대한 압축일의 비율이 약 80%, 고온이 900℃일 경우에는 약 30%가 되며 온도차가 클수록 감소하게 된다. Back Work Ratio가 크게 되면 실제 압축기 및 팽창기의 효율을 고려할 때 순 동력발생량(팽창일과 압축일의 차이)이 적어지고 자력운전이 어려워지기까지 하기 때문에 에릭슨 사이클은 저온영역 운전에서보다는 고온영역에서 운전할수록 더욱 효과적이라고 할 수 있다. 그러나 랭킨사이클은 저온영역 운전시에도 상변화로 인해 팽창일에 대한 압축일의 비율이 매우 작으면서 가열과 응축과정이 등온과정에 가깝기 때문에 효율이 카르노사이클에 근접하게 되어 에릭슨 사이

Table 1. Comparison between Rankine and Ericsson cycle

구분	랭킨 사이클	에릭슨 사이클
특징		
압축	액상	기상
팽창	기상	기상
압축일/팽창일	1~2%	30%(900℃) ~80%(200℃)
저온영역운전 (200℃~300℃)	이상적(카르노 사이클 접근)	자력운전이 어려움
고온영역운전 (700℃~)	이상적 사이클 최대 열효율 약 40%	이상적 사이클 최대 열효율 약 60%
장치구성	장치구성과 시스템 매칭이 쉬움	스크롤 압축기와 팽창기 매칭 중요
효율	최대 효율의 한계가 있음	실제 열효율은 압축기/팽창기 효율에 지배적
개발방향	단기적으로 상용화개발 용이	스크롤 팽창기가 고온, 고효율화되면 가장 이상적

클보다 더욱 효과적이라고 할 수 있다. 반면 고온영역에서는 랭킨사이클이 에릭슨 사이클보다 이론적인 최대효율이 훨씬 낮기 때문에 불리하다고 할 수 있다. 시스템의 상용화 개발측면에서는 우선적으로 저온영역에서 운전되는 랭킨 사이클 엔진이 장치구성과 시스템 매칭이 간단하고 스크롤 팽창기술의 난이도가 낮기 때문에 단기간에 상용화가 가능할 것으로 예상되며, 발전효율이 낮아 열수요가 많은 지역에서 가정용 열병합 발전시스템으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 좀 더 다양한 지역에서 효율적으로 사용되기 위해서는 발전효율을 향상시킬 필요성이 있기 때문에 장기적으로는 고효율의 고온용 스크롤 팽창기를 적용한 에릭슨 사이클 엔진을 개발할 필요성이 있다고 할 수 있다.

4. 스크롤 압축기/팽창기의 냉각/가열 실험

4.1. 스크롤 압축기의 냉각실험

본 논문에서는 상용 무연할 공기압축기로 사용되고 있는 스크롤 압축기의 공랭식 냉각구조를 수냉식으로 개조하여 실제적으로 압축과정에서 어느 정도 효과적으로 냉각을 할 수 있는지를 실험적으로 확인하였다. Fig. 11은 실험에 사용된 스크롤 압축기로서 압축비는 약 8정도이며 고정스크롤 외부와 선회스크롤 외부에 냉각판이 있어 팬으로 냉각을 하는 공랭식 구조를 가지고 있다. 본 실험에서는 원래의 공랭식일 경우(1)와 고정스크롤부만 수냉식으로 개조하여 적용할 경우(2), 선회스크롤부까지 수냉식을 적용할 경우(3)에 대하여 각각 대기압의 공기를 8bar까지 압축할 때 출구온도를 측정하여 압축시 온도상승정도를 비교하였다. Fig. 11은 실험결과로서 압축기의 회전수가 증가할수록 압축 시간이 짧아지기 때문에 온도상승이 커지며 공랭식의 냉각구조를 수냉식으로 개조할 경우 2500RPM에서 온도상승이 130℃에서 70℃ 정도로 감소함을 볼 수 있다. 그러나 일반적인 공기압축기 용도가 아닌 열기관용 스크롤 압축기의 경우 보다 효과적인 냉각을 위해서는 스크롤 랩의 높이를 낮게 하고 좌우대칭구조의 Double Scroll Wrap구조가 적합하며 중심부로 압축될수록 좁은 면적에서 효과적인 냉각이 필요하므로 스크롤 팽창기 외부를 히트파이프 구조로 한 냉각시스템이 효과적일 것으로 생각된다.

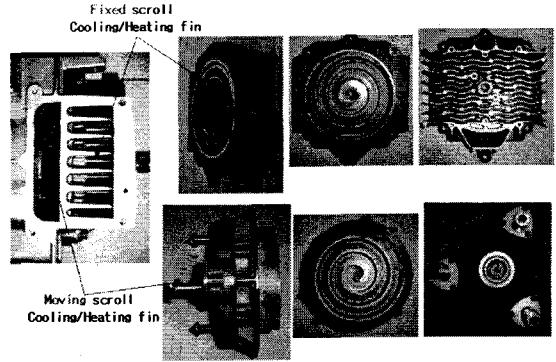


Fig. 11 Used commercial scroll air compressor

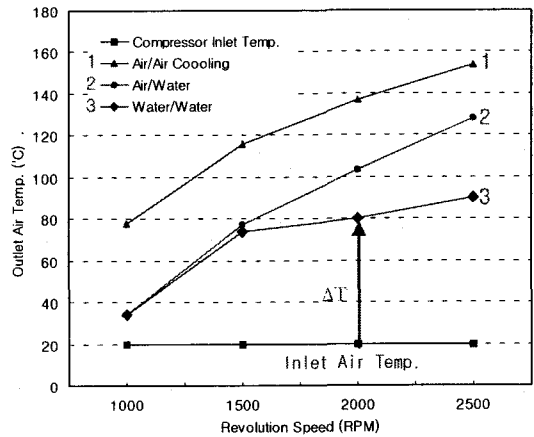


Fig. 12 Cooling effect of the scroll compressor

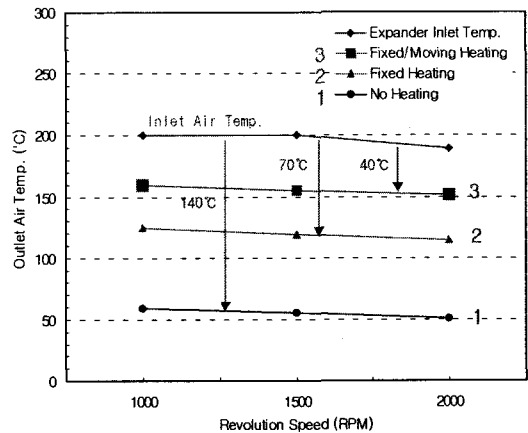


Fig. 13 Heating effect of the scroll expander

4.2. 스크롤 팽창기의 가열실험

위의 상용 무윤활 공기압축기를 반대로 스크롤 팽창기로 활용하여 실제적으로 팽창과정에서 어느 정도 효과적으로 가열을 할 수 있는지를 실험적으로 확인하였다. 끓는점이 300℃인 열매체유를 이용하여 스크롤 팽창기를 가열하지 않은 경우(1)와 고정스크롤부를 200℃의 열매체유로 가열할 경우(2), 선회스크롤부까지 열매체유로 가열할 경우(3)에 대하여 각각 200℃, 8bar의 압축공기를 스크롤 팽창기에 공급할 때 팽창 후 출구온도를 측정하여 팽창시 온도강하정도를 비교하였다. Fig. 13은 실험결과로서, 스크롤 팽창기를 가열하지 않은 경우의 온도강하 140℃에 비해 고정스크롤부와 선회스크롤부 모두 열매체유로 가열할 경우는 온도강하가 40℃로 감소하였다. 가장 큰 특징은 앞서 스크롤 압축기의 냉각실험과는 달리 팽창기의 회전수에 관계없이 온도강하가 거의 일정하다는 점이다. 이는 스크롤 압축기에서는 중심부로 압축될수록 압축에 의해 온도는 상승하고 냉각 면적은 감소하기 때문에 회전수가 증가하여 압축시간이 짧아질수록 냉각효과가 떨어지게 되지만, 스크롤 팽창기에서는 주변주로 팽창될수록 팽창에 의해 온도가 강하하지만 가열면적도 증가하기 때문에 회전수가 증가하여 팽창시간이 짧아져도 가열효과는 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 따라서 스크롤기기의 압축과 팽창과정에서 이러한 열전달 특성을 고려할 때 팽창의 경우가 등온과정에 가까운 과정을 실현하기에 훨씬 유리할 것으로 생각된다. 압축기와 마찬가지로 열기관용 스크롤 팽창기는 스크롤 랩의 높이를 낮게 하고 좌우대칭구조의 Double Scroll Wrap구조가 적합하며 균일한 온도의 효과적인 가열을 위해 스크롤 팽창기 외부를 히트파이프 구조로 한 가열시스템이 효과적일 것으로 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는 열기관용 스크롤 팽창기에서 작동유체의 연속적인 팽창과 온도강하로 인해 발생하는 스크

롤랩 전체의 온도구배와 이로 인한 열변형의 차이를 해결하기 위해 스크롤 팽창기 외부를 균일한 온도로 가열할 수 있는 가열구조를 갖는 스크롤 팽창기와 이를 이용한 시스템을 제시하였다. 제시된 스크롤 팽창기와 이를 이용한 시스템의 특징은 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 1) 스크롤 팽창기의 외부를 균일한 온도로 효과적으로 가열하기 위해서는 히트파이프 원리를 이용한 가열방법이 가장 효과적일 것으로 생각된다.
- 2) 제시된 스크롤 팽창기는 랭킨사이클 및 에릭슨 사이클에 적용될 수 있으며, 재열 및 재생과정으로 일반적인 사이클에 비해 열기관의 열효율 및 비출력을 향상시킬 수 있다.
- 3) 제시된 스크롤기기를 적용한 에릭슨 사이클은 역으로 냉동사이클로 활용될 수 있으며, 스크롤 팽창기 자체에서 팽창과 동시에 열을 흡수할수록 소요동력은 줄어들면서도 냉각용량은 증가하기 때문에 COP가 증가하게 된다.

참고문헌

- (1) G. Walker, 1980, Stirling Engines, Oxford University Press, New York, pp. 20.
- (2) C. M. Hargreaves, 1991, The Philips Stirling Engine, Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam, pp.208.
- (3) Yunu A. Cengel, and Michael A. Boles, 1989, Thermodynamics: An engineering approach, McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 450.
- (4) H. J. Kim, I. Park, and P. C. Rha, 2003, Development of scroll expander for power generation, International Conference on Compressors and their Systems, ImechE.
- (5) R. Zanelli, and D. Favrat, 1994, Experimental investigation of a hermetic scroll expander-generator, Proceedings of International Compressor Engineering Conference At Purdue, Ray W. Herrick Laboratories: p. 459-464.