

태양열 발전용 스크롤 방식 스텔링 엔진의 특성

*김 영민¹⁾, 신 동길²⁾, 김 우영³⁾, 김 현진⁴⁾, 이 상태⁵⁾

Characteristics of Scroll-type Stirling Engine for Solar Power

*Youngmin Kim, Dongkil Shin, Wooyoung Kim, Hyunjin Kim, Sangtae Lee

Key words : Stirling Engine(스털링 엔진), Scroll Compressor(스크롤 압축기), Scroll Expander(스크롤 팽창기), Recuperator(재생열교환기), Thermal Efficiency(열효율)

Abstract : Stirling engine is a promising heat engine with a high efficiency, multi-fuel capability, low emission, quiet operation, very low maintenance and long life. As one of the promising applications, solar power system based on the Stirling dish, providing net solar-to-electric conversion efficiencies reaching 30%, can operate as stand-alone units in remote locations or can be linked together in groups to provide utility-scale power.

This paper introduced a new Scroll-type Stirling engine, being developed for solar power, superior to conventional Stirling engines. The Scroll-type Stirling engine is characterized as traits of continuous and wholly separated compression and expansion; one-way flow system; direct cooling and heating the fluid in the working spaces through the extensive inner surfaces of scroll wraps. All these traits contribute to achieving thermodynamic cycle closer to the ideal Stirling cycle (exactly speaking, Ericsson cycle).

1. 서 론

고유가, 환경문제, 부존자원의 고갈 등의 문제로 인해 최근 세계적으로 신재생 에너지 이용에 대한 관심이 증가하고 있으며, 고온 태양열 발전의 경우 발전(Solar to Electricity) 효율이 태양광 발전에 비해 2배 이상으로 대량생산을 통해 경제성을 확보할 경우 신재생 에너지를 이용한 발전으로서 충분히 경쟁력을 확보할 수 있다.

스털링 엔진은 외부의 열원으로 밀폐된 공간 내의 작동가스를 가열 및 냉각함으로써 발생하는 압력변화로부터 동력을 발생하는 외연기관으로, 높은 열효율, 연료의 다중성, 배기가스의 청정함, 저소음, 저진동, 유지보수의 편리함 등 많은 장점을 가지고 있어 선진국에서는 수십년간 다양한 용도로 기술개발이 진행되어 왔으며, 축적된 기술을 바탕으로 최근에는 태양열 발전용 뿐만 아니라 분산형 열병합 발전시스템의 구동기로서 상용화를 앞두고 있다.

스털링 엔진의 경우 내열재료, 시일 기술, 부하제어 등 기술적 난이도가 매우 높으나, 국내에서는 축적된 기술력이 부족하기 때문에 개발기간이 장기화될 우려가 있으며 일부 기술은 특허화되어 있어 최근 한국기계연구원에서는 기존 피스톤 방식의 스텔링 엔진보다 원리적으로 효율이

높고 많은 장점을 가지는 새로운 스크롤 방식 스텔링 엔진을 고안하여 원리에 대한 원천특허를 확보하고 선행연구를 진행해 왔으며, 현재 신재생에너지개발사업의 일환으로 고온 태양열 발전용 스크롤 방식 소형 스텔링 엔진 개발을 진행하고 있다.

본 논문에서는 종래의 피스톤 방식 스텔링 엔진과 이상적 스텔링 사이클과의 차이점에 대해서 알아보고, 이러한 사이클 결함을 해결할 수 있고 많은 장점을 가지는 스크롤 방식 스텔링 엔진의 원리와 그 특징에 대해서 소개하고자 한다.

-
- 1) 한국기계연구원 친환경엔진연구팀
E-mail : ymkim@kimm.re.kr
Tel : (042)868-7377 Fax : (042)868-7305
 - 2) 한국기계연구원 친환경엔진연구팀
E-mail : sdk@kimm.re.kr
 - 3) 인천대학교 대학원
E-mail : blu2runa@paran.com
 - 4) 인천대학교 기계공학과
E-mail : kimhj@incheon.ac.kr
 - 5) (주) 템피아
E-mail : sang501@empal.com

2. 스텔링 엔진에 대한 고찰

2.1 스텔링 엔진의 원리

스텔링 엔진은 밀폐된 작동가스를 주기적으로 가열 냉각함으로써 발생하는 압력변화를 이용하여 동력이 발생하는 외연기관이다. Fig. 1은 이상적인 스텔링 사이클의 개념도이며 Fig. 2는 이에 따른 압력/체적(PV) 선도를 나타낸 것이다. 스텔링 사이클의 구성은 Fig. 1과 같이 두 개의 대향피스톤과 중앙에 통기성이 있는 축열체를 충전시킨 재생기로 구성되어 있고 팽창공간은 고온(T_H)으로 유지되고 압축공간은 저온(T_L)으로 유지된다. 스텔링 사이클의 작동과정은 다음과 같다.

1. 과정 I-II: 등온압축
우측 피스톤에 의해 압축이 되면서 저열원 T_L 으로 열량 q_{out} 이 전달되면서 등온적으로 압축
2. 과정 II-III: 정적가열(정적재생)
두 피스톤이 동시에 좌측으로 같은 비율로 이동하여 체적일정하에서 재생기로부터 열을 받으면서 T_L 에서 T_H 로 온도와 압력이 상승
3. 과정 III-IV: 등온팽창
좌측 피스톤에 의해 고열원 T_H 로부터 열량 q_{in} 을 공급받으며 가스는 등온적으로 팽창
4. 과정 IV-I: 정적방열(정적재생)
두 피스톤이 동시에 우측으로 같은 비율로 이동하여 체적일정하에서 재생기로 방열하면서 T_H 에서 T_L 로 온도와 압력이 강하

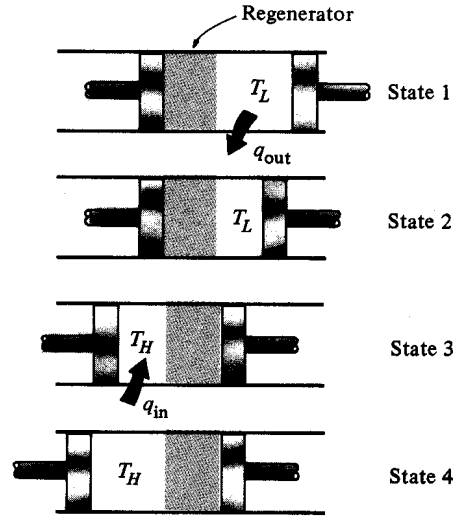
그러나 실제 왕복동 스텔링 엔진은 Fig. 3과 같이 90° 정도의 위상차를 유지하면서 연동하는 팽창피스톤과 압축피스톤을 설치하고 팽창공간(고온)과 압축공간(저온)을 재생기로서 접촉하는 구조로서, 전열면적이 작은 실린더내부 벽면을 통하여 빠른 시간 내에 작동가스를 가열 냉각하는 것은 힘들기 때문에 일반적으로 재생기 앞뒤로 별도의 히터와 쿨러가 설치된다.

스텔링 엔진은 외연기관이기 때문에 액체연료, 가스연료, 석탄, 고체연료, 폐열, 태양열 등 다종의 열원을 사용할 수 있으며, 팽창 후 작동가스를 배출하는 내연기관과는 달리 히터와 쿨러 사이에 설치된 재생기의 작용으로 원리적으로 가장 높은 효율을 가진다. 또한 밸브가 없고 압력변화가 매끄럽기 때문에 내연기관에 비해 소음과 진동이 작고 연속적이기 때문에 연소제어가 용이하여 배기가스를 깨끗하게 할 수 있는 특징을 가지고 있다.

2.2 실제 엔진과 이상적 스텔링 사이클과 차이

스텔링 엔진은 이상적으로 카르노 사이클과 같은 효율 $\eta_{th} = 1 - T_L/T_H$ 을 가지나 실제적으로는 이론적 효율의 절반정도의 효율을 가지며 이상적 사이클과 실제 사이클 간에 차이가 발생하는 요인과 이상적 사이클 구현의 어려움은 아래와 같다.

먼저 이상적인 스텔링 사이클에서는 Fig. 1과



The execution of the Stirling cycle.

Fig. 1 Simplified ideal Stirling cycle

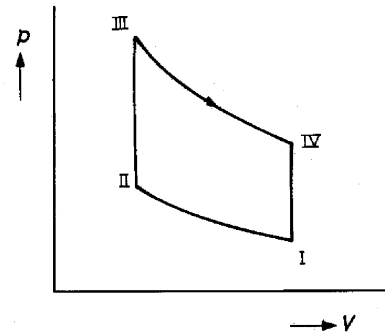


Fig. 2 Pressure/volume(PV) diagram of ideal Stirling cycle

같이 피스톤이 비연속적으로 움직이므로 저온부에서는 압축과정만 일어나고 고온부에서는 팽창과정만 발생하나, 실제 왕복동 스텔링 엔진에서는 Fig. 3과 같이 압축피스톤과 팽창피스톤이 연동되어 연속적으로 움직이므로 저온부 피스톤에 의한 팽창과정시 저온부 피스톤에 의해서도 약간의 팽창이 발생되기 때문에 Fig. 4와 같이 PV 선도를 그리게 되어 엔진의 출력이 이상적인 스텔링 사이클보다 낮아지는 요인으로 작동하게 된다^(2,3)

두 번째로 실제 왕복동 스텔링 엔진에서 빠른 열전달을 위해 실린더외부에 전열판을 충분히 설치한다 하더라도 작동가스와 접하는 실린더내부 벽면의 면적이 작기 때문에 압축과 팽창과정이 등온과정으로 이루어지지 않게 된다. 엔진이 고속화/대형화 될수록 열전달은 더욱 어렵게 되며 운전속도가 약 1000(rev/min) 정도에서도 등온과정보다는 단열과정에 가깝게 된다⁽³⁾. 따라서 일반적으로 작동가스의 실제적인 가열과 냉각을 위

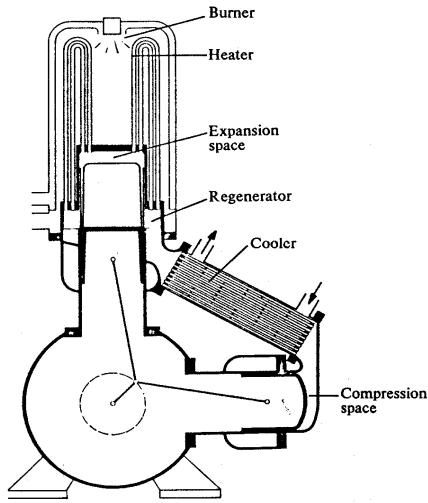


Fig. 3 Schematic of a Stirling engine

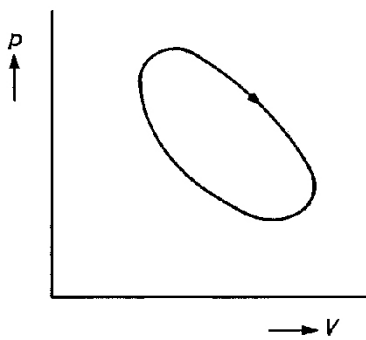


Fig. 4 Pressure/Volume(PV) diagram of real Stirling cycle

해서는 재생기 앞뒤에 별도의 히터와 쿨러를 설치하게 되며 여기에서 대부분의 열전달이 이루어지게 된다. 이러한 히터와 쿨러의 이용은 작동가스의 효과적인 가열과 냉각을 가능케 하여 비출력을 증가시키는 긍정적인 측면도 있지만 다음과 같은 부정적인 측면이 있다. 먼저 압축/팽창공간이 아닌 히터, 재생기, 쿨러 등으로 이루어지는 사체적(dead volume)의 증가는 출력을 감소시키는 요인으로 작용하게 된다⁽³⁾. 또한 히터에서 가열된 작동가스가 실린더에서 팽창 후 재생기에서 열을 저장하기 전에 히터를 지나면서 불필요하게 재가열되고, 쿨러를 지난 작동가스는 실린더에서 압축 후 재생기에서 열을 되찾기 전에 쿨러를 지나면서 불필요하게 재냉각되는 과정으로 인한 사이클의 결함이 발생되어 유동저항이 증가하고 열효율이 감소하게 되며⁽³⁾ 구성부품의 열피로(thermal stress)를 증가시키게 되어 구성부품의 재질선택과 제작에도 상당한 제약요인이 될 수 있다⁽²⁾.

3. 새로운 스크롤 방식 스텔링 엔진

3.1 스크롤 기기의 원리

스크롤기기는 고효율, 저소음 및 저진동, 소형 및 경량의 특징을 갖고 있으며 현재 압축기로서 널리 사용되고 있다. 스크롤 압축기와 스크롤 형상은 Fig. 5와 같다. 스크롤 압축기의 원리는 Fig. 6과 같이 인볼류트 형상의 고정스크롤과 선회스크롤이 180°의 위상차를 가지며, 이로 인하여 스크롤 내부에는 초승달 모양의 밀폐공간이 여러 개 존재하게 된다. 고정스크롤의 원주에 위치한 흡입구를 통하여 가스가 스크롤 내로 유입되면 선회스크롤의 선회운동에 의해 초승달 모양의 밀폐공간이 중심부로 이동되면서 밀폐공간의 체적이 작아지고 가스는 압축되어 고정스크롤 중심부의 토출구로 토출된다. 이 때 스크롤 내부에는 초승달 모양의 여러 개의 밀폐공간에 의해 일련의 과정이 연속적으로 이루어지게 된다. 스크롤 팽창기는 이와 역순으로, 반대로 고정스크롤 중심부로 고압의 가스가 유입되면 선회스크롤을 밀어내면서 팽창이 이루어지고 고정스크롤의 원주로 토출되면서 선회스크롤의 선회운동에 의한 동력이 발생하게 된다.

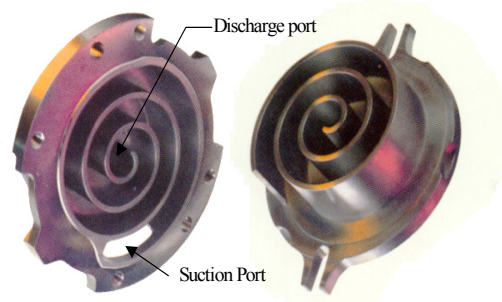


Fig. 5 Scroll compressor and scroll shape

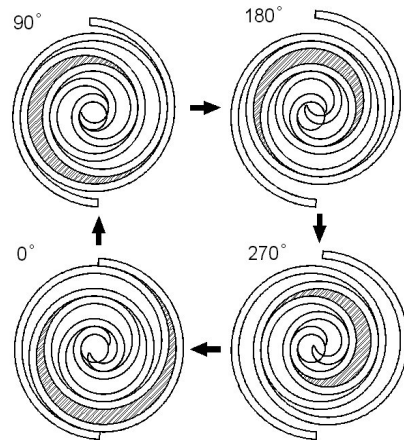


Fig. 6 Gas compression process (reverse process, expansion)

3.2 스크롤 방식 스텔링 엔진

스크롤기기를 적용한 새로운 스텔링 엔진은 종래의 스텔링 엔진의 왕복동 피스톤 대신 Fig. 7의 개념도와 같이 한 쌍의 스크롤 압축기와 스크롤 팽창기로 구성되어 있다. 압축시 고정스크롤과 회전스크롤 사이의 작동유체에서 발생하는 열은 열교환을 통해 저열원으로 방출되며 압축된 작동유체는 스크롤 팽창기로 이동되어 팽창이 이루어진다. 팽창시에는 고열원으로부터 열교환을 통해 열이 공급되며 팽창된 작동유체는 다시 스크롤 압축기로 공급되어 사이클을 이루게 된다. 이때 효율향상을 위해 압축기에서 팽창기로 이동되는 저온의 작동유체와 팽창기에서 압축기로 공급되는 고온의 작동가스 사이에 열교환기를 통해 재생 열교환이 이루어지도록 구성된다.

스크롤 방식 스텔링 엔진은 열역학적으로 엄밀히 말해 스텔링 사이클보다 에릭슨 사이클에 가깝다고 할 수 있다. 스텔링 사이클과 에릭슨 사이클은 Fig. 8과 같이 모두 등온 압축/팽창 과정은 동일하나 재생과정이 등적 과정인 경우는 스텔링 사이클로, 등압과정인 경우는 에릭슨 사이클로 구분되고 있으며 이상적으로는 두 사이클 모두 효율이 카르노 사이클과 같고 주어진 압력, 부피, 온도 범위 내에서 카르노 사이클 보다 출입 열과 일이 큰 특징을 가지고 있다.

엔진 효율향상을 위해서는 압축/팽창과정에서 얼마나 효과적으로 냉각/가열하여 등온과정에 가깝게 할 수 있는가가 매우 중요하며 압축시 효과적으로 냉각할수록 Fig. 9의 P-V 선도에서 면적 A_1 만큼 압축일이 감소하고 팽창시 효과적으로 가열할수록 A_2 만큼 팽창일은 증가하게 된다. 등온압축을 위해서는 스크롤의 넓은 전열면을 통해 스크롤 압축기 외부로 냉각하거나 작동가스에 불활성 액체를 분사하여 압축시 발생하는 열을 흡수하고 압축 후 분리하는 방법이 가능하며 등온팽창을 위해서는 스크롤 팽창기 외부로 가열하거나 작동가스에 고온의 불활성 액체를 분사하여 팽창시 열을 공급하고 팽창 후 분리하는 방법이 사용될 수 있다.

3.3 스크롤 방식 스텔링 엔진의 장점

스크롤기기를 적용한 새로운 스텔링 엔진은 많은 우수한 특징을 가짐으로서 종래의 왕복동 스텔링 엔진과 이상적인 사이클 간의 차이를 극복할 수 있으며 특징은 아래와 같다.

1. 연속적, 동시적인 4과정

종래의 스텔링 엔진에서는 두 개의 피스톤이 위상차를 가지고 동시에 운동함으로써 작동가스가 고온과 저온의 작동공간을 이동하면서 압력과 온도가 주기적으로 변하게 되며, 스텔링 사이클의 4과정이 순차적으로 이루어지게 된다. 그러나 스크롤 방식 스텔링 엔진에서는 스크롤 압축기와 팽창기내의 일련의 초승달 모양의 체임버에 의해 4과정이 연속적으로 동시에 일어나기 때문에 토크변동이 거의 없고 소음 진동이 줄어들게 되며 매우 컴팩트하기 때문에 비출력이 향상되게 된다.

2. 작동공간내의 넓은 전열면적

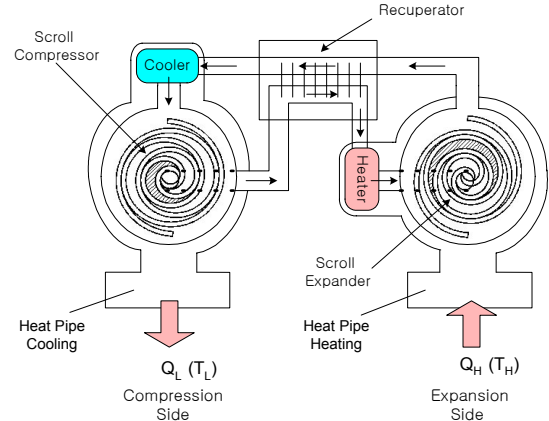


Fig. 7 Scroll-type Stirling engine

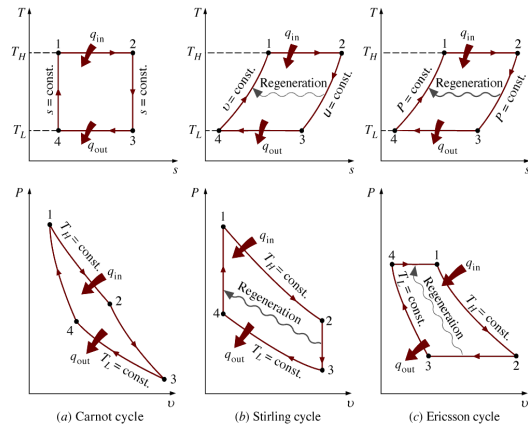


Fig. 8 Carnot, Stirling, Ericsson cycle

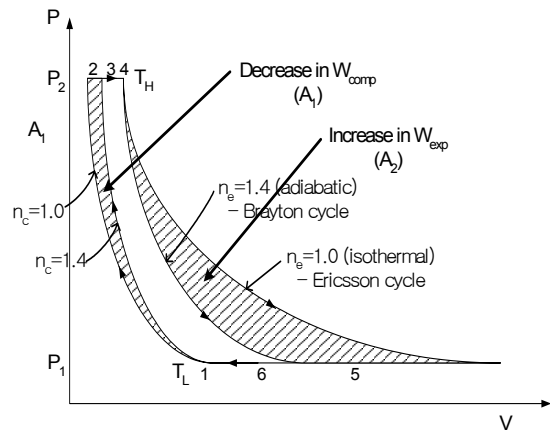


Fig. 9 Carnot, Stirling, Ericsson cycle

종래의 스텔링 엔진에서는 실린더 외부에 전열면을 충분히 설치한다 하더라도 작동유체와 접하는 실린더내의 전열면적이 충분하지 않기 때문에 별도의 히터와 쿨러를 필요로 하게 된다. 그러나 스크롤 방식 스텔링 엔진에서는 스

스크롤랩에 의하여 작동공간내의 유체와 접하는 전 열면적이 매우 넓고 동일한 엔진회전수에서 왕복동 엔진보다 작동공간내 체류시간이 증가하기 때문에 히터와 쿨러를 작동공간과 통합하거나 또는 별도의 히터와 쿨러 부분을 최소화하는 것이 가능하다. 이러한 특징은 압축과 팽창과정을 이상적 등온과정에 가깝게 하여 엔진 효율이 향상되게 된다.

3. 자연적인 One-way flow 시스템

종래의 스티어링 엔진에서는 작동유체가 압축과 팽창공간, 그 사이의 히터, 쿨러, 재생열교환기를 왕복하는 왕복유동(reciprocating flow)이기 때문에 팽창 후 재가열되고 압축 후 재냉각되는 사이클 결합으로 인해 효율이 저하되지만, 스크롤 타입 스티어링 엔진은 별도의 히터와 쿨러를 설치하더라도 자연적으로 편방향유동(one-way flow)이기 때문에 사이클 결합이 전혀 발생하지 않아 효율이 향상되며 재생기, 히터, 쿨러 내에서의 열피로와 유동저항이 줄어드는 장점이 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 현재 태양열 발전용 소형 스티어링 엔진으로 개발되고 있는 새로운 스크롤 방식 스티어링 엔진의 원리와 장점을 기존 피스톤 방식 스티어링 엔진과 비교하여 소개하였으며 아래와 같이 요약할 수 있다.

(1) 스크롤 방식 스티어링 엔진은 종래의 왕복동 피스톤 기구대신 압축/팽창이 연속적인 스크롤 압축기/팽창기를 이용하여 종래의 스티어링 엔진과는 달리 작동유체가 편방향(one-way)으로 이동되면서 정상상태(steady-state)로 운전되기 때문에 토크변화가 없고, 유동저항이 줄어들며, 히터와 쿨러에 의한 작동가스의 불필요한 재가열과 재냉각 과정이 없으며, 저온부 압축과 고온부 팽창의 완전한 분리로 이상적인 사이클에 근접하여 효율이 향상되며 구성부품의 열피로가 줄어드는 장점이 있다.

(2) 스크롤 방식 스티어링 엔진은 스크롤랩을 통하여 압축기/팽창기내의 작동유체를 효과적으로 냉각/가열함으로써 고효율의 등온 압축/팽창과정을 실현하여 종래의 스티어링 엔진보다 엔진의 효율과 출력을 향상시킬 수 있다.

(3) 스크롤 방식 스티어링 엔진은 여러 가지 장점으로 인해 태양열 발전 뿐만 아니라 분산형 열병합 발전, 바이오 연료와 폐열 등 다양한 에너지원을 이용한 발전 등 다양한 분야에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] C. M. Hargreaves, 1991, The Philips Stirling Engine, Elsevier Science Publisher B. V.
- [2] ETSU, 1993, A Technical and Economic Assessment of Small Stirling Engines for Combined Heat and Power, Future Practice Report No 32.
- [3] G. Waker, 1980, Stirling Engines, Oxford University Press.
- [4] Theocharis Tsoutsos, Vasilis Gekas, Katerina Marketaki, 2003, "Technical and economical evaluation of solar thermal power generation", Renewable Energy 28, pp. 873-886.
- [5] Youngmin Kim, Dongkil Shin, Janghee Lee, Kwenha Park, 2003, "Noble Stirling engine employing scroll mechanism", Proceedings of the 11th International Stirling Engine Conference, pp. 67-75.