

해설논문

(Special issue)

## 스털링엔진/발전기 기술 동향 Technical Trend of Stirling Engine/Alternator



박 성 제

Seong-Je Park

· 한국기계연구원 책임연구원  
· sjpark@kimm.re.kr



고 준 석

Jun-Seok Ko

· 한국기계연구원 선임연구원  
· jsko@kimm.re.kr



홍 용 주

Yong-Ju Hong

· 한국기계연구원 책임연구원  
· yjhong@kimm.re.kr



김 호 봉

Hyo-Bong Kim

· 한국기계연구원 책임기술원  
· hyobong@kimm.re.kr

### 1. 서 론

스털링엔진은 열 형태의 에너지 입력으로 작동할 수 있어 전력공급이 힘든 오지 및 낙도 등에 전기를 공급할 수 있는 주요한 발전용 기관으로서 사용할 수 있다. 또한 최근에 스텔링엔진은 화석연료의 고갈과 가격상승으로 다시 관심을 받게 되었다. 스텔링엔진의 적용에 주요한 장애물은 적절한 작동을 위해 부품들의 정밀가공 및 까다로운 공차관리로 인한 단가 상승이었다. 따라서 스텔링엔진에 대한 정확한 이해는 정밀 설계가 필요한 부품 이외는 과도한 공차관리를 피하면 단가를 낮출 수 있기 때문에 앞으로의 적용 가능성을 확장할 수 있을 것이다<sup>1)</sup>.

스털링엔진은 피스톤과 실린더로 이루어진 공간내에 헬륨, 수소 등의 작동가스를 밀봉하고, 이를 외부에서 가열, 냉각시킴으로써 발생하는 피스톤의 운동을 통해 기계적인 에너지를 얻는 외연기관이다. 스텔링엔진은 가스/액체/고체 연료를 모

두 사용할 수 있으며, 연소조건의 최적화 및 제어를 통해 청정한 연소가 가능하고, 배기열손실이 없고 재생기에 의한 열회수로 인해 원리적으로 가장 높은 열효율을 달성할 수 있다. 또한 왕복동 방식의 내연기관에 비해 소음과 진동이 현저하게 작아 실내 설치조건에도 적합하여 소형 가정용 열병합 발전시스템의 동력원으로 적합한 것으로 평가받고 있다<sup>2)</sup>.

특히 스텔링엔진의 피스톤을 다른 구조물에 전혀 구속되지 않도록 설계한 자유피스톤 방식은 구조가 간단하고, 부품수를 줄일 수 있어 제작단가를 현저히 낮출 수 있는 장점이 있으며, 왕복기 베어링으로써 플렉서 베어링을 도입함으로써 축력 발생의 위험성을 제거하여 왕복기와 실린더 사이의 마찰이 없고, 윤활을 하지 않아 고수명의 장점을 가지고 있다<sup>3-5)</sup>.

자유피스톤 스텔링엔진(Free-piston stirling engine, FPSE)은 최초로 미국의 NASA와 MTI가 SP-100 프로그램으로 개발된 25 kW급 스텔링엔진

이다. 이 시스템은 진동을 상쇄시키기 위해 12.5 kW 엔진을 양방향으로 2개가 마주보도록 설계, 제작되었고, 약 1500시간 작동 후 추가 연구를 위해 분해되었다<sup>6)</sup>.

스털링엔진 파워피스톤의 왕복운동은 직선운동을 회전운동으로 변경하여 회전형 발전기로 전기를 발생할 수도 있고, 직선운동을 이용하여 선형 발전기로 전기를 생산할 수도 있다. 특히 선형발전기에 의한 전기발생은 크랭크를 사용하지 않기 때문에 구조를 간단히 할 수 있다<sup>7)</sup>.

본 원고에서는 스텔링엔진/발전기의 적용을 확장하기 위하여, 스텔링엔진의 구성 및 작동원리와 국내외 개발현황 및 응용분야를 서술하고, 국내 개발 과정을 통해 성능향상 방안에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 스텔링엔진의 구성 및 작동원리

스털링 엔진/발전기는 피스톤과 실린더로 이루어진 공간 내에 헬륨/수소 등의 작동가스를 밀봉하고 이를 외부에서 가열, 냉각시킴으로써 발생하는 피스톤의 운동을 통해 기계적 에너지를 얻는 외연기관 및 일체형 발전기이다.

스털링엔진은 연소기, 왕복기, 피스톤, 재생기 및 열교환기 등으로 구성된다.

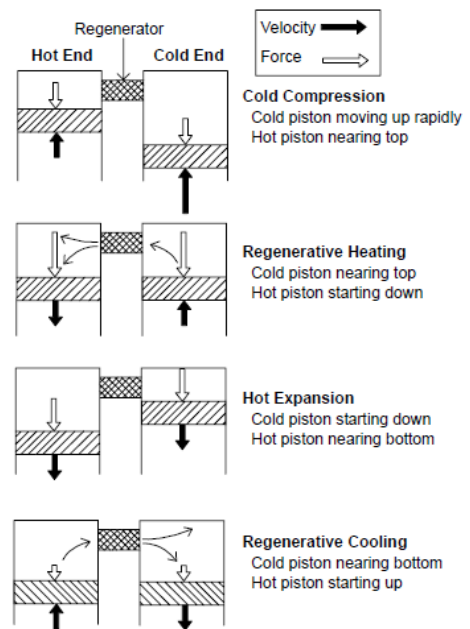
스털링엔진의 주요 특징은 엔진 외부의 연소기 및 열교환기를 통한 외부로부터의 연속적인 가열과 냉각이 이루어지며, 엔진 내부 재생기를 통한 내부 열재생 사이클이고, 복수의 피스톤의 구동으로 발생하는 작동가스의 왕복운동으로 작동된다.

스털링엔진은 이상적인 열역학사이클인 카르노 사이클과 동등한 효율의 스텔링사이클을 기반으로 하며, 스텔링사이클은 등온압축(cold compression), 등적가열(regenerative heating), 등온팽창(hot expansion), 등적냉각(regenerative cooling)의 4개 과정으로 구성된다.

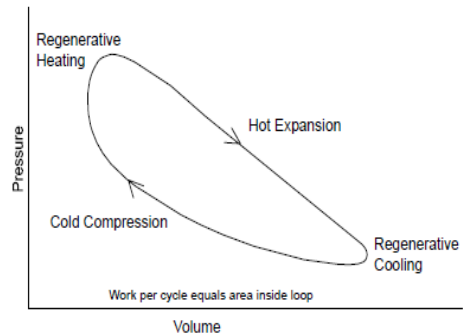
이상적인 스텔링사이클은 Fig. 1(a)과 같이 두 개의 피스톤과 재생열교환기(regenerator)로 구성되며, 압축피스톤의 이동을 통해 압축된 작동유체는 압축 및 팽창피스톤의 이동에 의해 재생열교환기

를 통과하면서 가열되고, 연속적인 팽창피스톤에 의한 팽창을 통해 고온열원(열교환기)으로부터 열을 흡수한다.

고온의 작동유체는 팽창 및 압축피스톤의 이동에 의해 재생열교환기를 통과하면서 저온으로 냉각된다. Fig. 1(b)는 이와 같은 4개의 과정을 나타낸 열역학적인 압력-체적선도이다. 실제의 스텔링엔진은 압축피스톤을 팽창피스톤에 대해 90도의 위상차로 구동함으로써 이와 같은 스텔링 사이클을 구현한다.



(a) Operating process of the Stirling engine



(b) Pressure-volume diagram of the Stirling engine

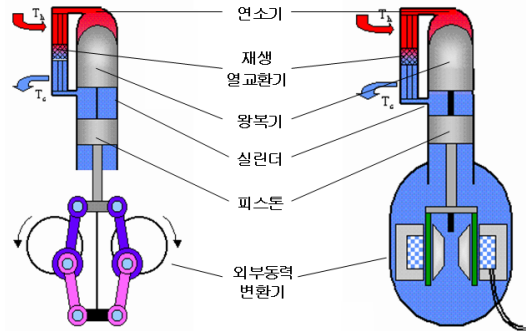
Fig. 1 Operating principle of the Stirling engine

스털링엔진은 작동모드, 실린더의 배열형태, 피스톤과 디스플레이서의 연결 형태에 따라 다음과 같이 다양하게 구분된다

- 실린더의 배열 형태에 따른 구분
  - Alpha 엔진 : 두 개의 분리된 독립 피스톤 구조
  - Beta 엔진 : 동력피스톤과 왕복기가 직선 구조로 정렬
  - Gamma 엔진 : 동력피스톤과 왕복기가 분리된 독립실린더에 배치
- 동력전달 구조에 따른 구분
  - Kinematic 엔진 : 크랭크축 및 기계적 연결 기구에 의해 동력이 전달되고 회전형 발전기에 의해 전력생산(Alpha, Beta, Gamma 엔진 적용 가능)
    - Wobble plate 또는 Z-크랭크 동력전달기구 : Dual-acting 스텔링엔진 구조
    - Swashplate 동력전달기구 : 소형 고출력엔진에 적합
    - Rhombic 동력전달기구 : 대형 엔진에 적합
  - Free piston 엔진 : 동력피스톤과 변위기가 스프링-질량-댐퍼 시스템에 의해 선형적으로 구동되며, 동력피스톤과 연결된 선형발전기에 의해 전력생산(Beta, Gamma 엔진 적용가능)
    - 회전부가 없음으로 인해 축력 발생과 무운할 운전이 가능
    - 구동부 부품이 작아 유지보수기간이 길고, Kinematic형에 비해 효율이 높음
    - 밀봉구조의 엔진의 구성이 가능하여 다양한 환경조건에 적용 가능

Fig. 2는 기구적으로 연결된 구동기구와 자유피스톤 구동기구로 구성된 스텔링엔진의 구조를 보여주고 있다. 기구적으로 연결된 구동기구로 구동되는 스텔링엔진은 피스톤의 선형운동을 회전력으로 변환하여 동력을 출력하며, 자유피스톤 구동기구로 구동하는 스텔링엔진은 회전부가 없어 원리적으로 축력이 발생하지 않아 무운할의 운전이

가능하고, 구동부의 부품이 작아 유지보수 기간에서 장점이 있으며, 동력피스톤과 변위기를 직선구조로 배치하여  $\beta$ 형 엔진을 구성하여 동력피스톤에 선형발전기(linear alternator)를 직접 연결할 수 있어, 소형 발전용으로 적합한 엔진 형태이다<sup>8)</sup>.



(a) kinematic type (b) free piston type  
Fig. 2. kinematic and free piston Stirling engine<sup>8)</sup>

다양한 형태의 스텔링 엔진은, 그 용도와 열원 등에 따라 최적 형태의 구조로 선택되어야 하며, 스텔링엔진의 개발을 위해 핵심 요소들을 구분하여 각 부품별 기술 개발이 요구된다.

- 연소기(burner)
  - 연소기는 스텔링 엔진의 열원을 공급하는데 사용되는 요소
  - 스텔링 엔진은 도시형의 경우 천연가스가 사용되고, 전원형의 경우 목질계나 액체연료가 주로 사용되며, 가정용엔진의 경우 높은 체적 열부하의 고집적성 연소부가 요구됨
  - 환경 규제에 대응하기 위해 NO<sub>x</sub>, CO 등의 배기가스 규제치를 만족할 수 있는 초저공해 연소기술이 적용됨
- 재생열교환기(regenerator)
  - 스텔링 엔진의 열유체역학적 핵심요소로, 고온 작동유체의 냉각, 저온작동 유체의 가열을 수행
  - 스텔링엔진의 효율 및 성능향상을 위해 짧은 시간에 높은 열전달 특성 및 작은 압력 손실이 요구되며, 고온 환경에서의 신뢰성 및 구조의 최적화 기술이 필요

○ 피스톤 및 실린더

- 스텔링엔진은 온도차에 의한 고/저온 실린더 내부에 밀폐된 작동유체의 압축 및 팽창으로부터 발생하는 피스톤의 운동으로 동력을 생성
- 간극 체적, 배제 체적, 피스톤 행정거리, 작동가스 누설, 수명 등 설계변수의 영향이 고려된 피스톤, 실린더의 최적 설계가 필수

○ 동력전달기구

- 스텔링엔진의 동력피스톤의 운동력을 발전기로 전달하는 기구
- 동력피스톤/변위기의 작동 조건, 스프링-질량-댐퍼 시스템 작동조건 등 FPSE 동력전달기구의 설계에 관한 상세 해석 및 설계 기술의 개발이 필수

○ 열교환기

- 스텔링엔진 고온부의 공기에열기, 연소열교환기, 저온부의 냉각기
- 스텔링엔진의 효율향상을 위해서는 열교환기의 소형화 및 고효율화가 필수

○ 선형발전기(linear alternator)

- 동력전달기구에 의해 동력피스톤과 연결되어 전력을 생산
- 스텔링엔진/발전기의 효율향상을 위해서는 모터 자속 최적설계, 엔진과 연계한 발전기 동특성 최적화 개발이 필수

2.2 스텔링엔진의 국내외 개발현황 및 응용분야

스털링엔진의 개발은 소형급의 1 kWe급 및 중대형 25 kWe급을 중심으로 세계적으로 약 20여개 회사가 개발 중에 있으며, 주요 응용분야는 태양열 발전, 가정용 열병합 발전, 바이오매스를 이용한 스텔링엔진 발전, 수송 분야, 군사, 우주 및 극저온 냉동기 분야 등이 있다.

(1) 태양열 발전 분야

스털링엔진/발전기를 이용한 태양열 발전시스템은 접시(dish)형태의 집광기를 통해 태양의 복사

에너지를 스텔링엔진에서 흡수하여 전기를 발생시킨다. 집광기는 태양의 고도와 방위로 추적하며, 약 1,000 - 10,000의 집광비로 태양을 집광하고 25 - 30%의 태양열 스텔링엔진 발전효율을 가진다. 공랭식 엔진으로 사막지역이나, 일조량이 많은 지역에서의 사용이 용이하다. 고 일사지역의 경우 접시형 태양열발전(Solar-to-Electricity) 효율이 태양광 발전에 비해 2배 이상으로 대량생산으로 경제성을 확보할 경우 경쟁력 확보가 가능하다.

국외에서는 Kockums(스웨덴)사의 25 kWe급 스텔링엔진을 이용하여 Boeing(미국)사가 집광 및 발전시스템을 개발하였으며, 최대/연간 발전효율은 각각 31.2%와 24%이었다(Fig. 3).

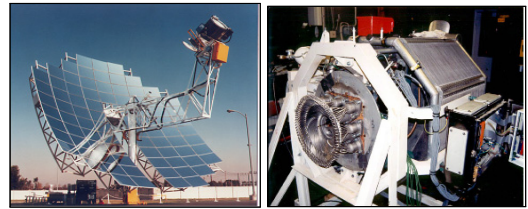


Fig. 3 Concentrated Solar Power(Boeing,Kockums)

또한 SAIC(Science Academic International Corporation, 미국)사가 STM Corporation(미국)의 22 KWe급 발전용량 스텔링 엔진을 이용하여 태양열 발전시스템을 개발하여 최대/연간 발전효율은 각각 24.3%와 18%이었으며(Fig. 4), SBP (Schlaich Bergermann und Partner, 독일)사가 Solo (독일)사의 스텔링엔진을 이용하여 80,000시간 이상의 운전 성공하였다(Fig. 5).



Fig. 4 Concentrated Solar Power(SAIC, STM)

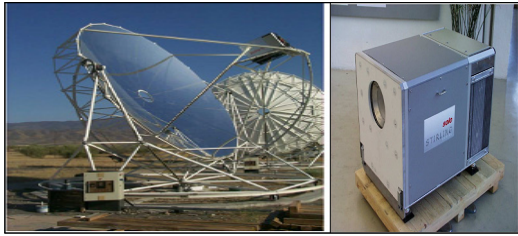


Fig. 5 Concentrated Solar Power(SBP, Solo)

국내에서는 (주)우신, 한국기계연구원, 한국에너지기술연구원 등이 10 kWe급 스텔링 엔진을 이용한 태양열 발전시스템을 개발하였으나, 핵심부품인 스텔링엔진/발전기는 외국에서 도입하여 개발하였고, 상용화에 이르지 못하는 못하였다.

(2) 소형 열병합 발전 분야

스텔링엔진/발전기를 이용한 열병합 발전 시스템은 최근 유럽의 보일러 회사를 중심으로 가정용 열병합발전 시스템의 개발 및 실증시험이 활발히 진행되고 있다.

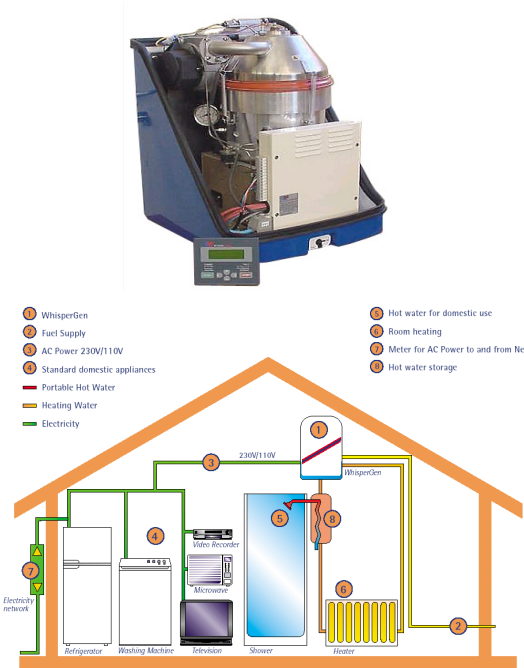


Fig. 6 Cogeneration system with Stirling engine/alternator(Wispertech)



Fig. 7 Cogeneration system with Stirling engine/alternator(Microgen)



Fig. 8 Cogeneration system with Stirling engine/alternator(ENATEC)

2002년 최초로 Wispertech(뉴질랜드)사가 850 W의 Wobble-yoke 기구에 기반을 둔 스텔링엔진/발전기를 이용한 열병합 발전 시스템을 상용화하여 판매를 시작하였다. Fig 6은 Wispertech사의 스텔링엔진과 열병합발전시스템에 적용한 사례를 보여주고 있다. 이 시스템에 적용된 스텔링엔진/발전기는 기구적으로 연결된 구동기구를 가지고 있다.

또한 2001년에 BG Group(영국)사와 Rinnai(일본)사는 Sunpower(미국)사의 자유피스톤 유형의 스텔링엔진/발전기를 사용한 1 kWe급 가정용 열병합 발전시스템의 공동개발 및 제조에 합의하여 현재 Microgen(영국)사를 설립하여 양산하고 있다 (Fig. 7). 그리고 분산발전 관련회사인 ENECO, 보일러회사인 ATAG, 스텔링 엔진 전문회사인 ECN이 합작하여 만든 회사인 ENATEC(네델란드)도 프로토타입을 제작, 시험 중에 있으며(Fig. 8), STM Power(미국)사는 25 kWe급 스텔링엔진/발전기를 이용하여 소형 열병합발전 시스템을 개발하여, 상용화를 준비하고 있다.

국내에서는 한국기계연구원이 한국에너지기술연구원과 대학교 및 국내기업과 공동으로 1 kWe급의 양방향 자유피스톤형 스텔링엔진/발전기를 개발하여 실증시험을 수행하고 있다(Fig. 9).

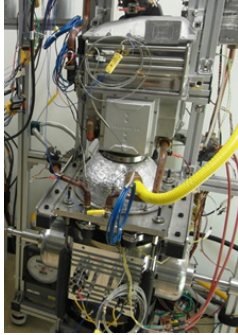


Fig. 9 Cogeneration system with Stirling engine/alternator(KIMM etc.)

(3) 바이오매스 이용 스텔링엔진 발전 분야

농가에서 손쉽게 구할 수 있는 바이오매스 및 가스를 이용할 수 있는 스텔링 엔진을 기름보일러 대체용으로 사용할 경우 온수 및 전기를 동시에 해결할 수 있어 농가의 경제부담 경감은 물론 정부의 친환경정책에도 부합할 것으로 기대된다.

Sunpower(미국)사는 1980년대부터 태양열발전 시스템용 스텔링엔진을 바이오매스용으로 개조, 개량하여 개발하고 있다.

미국 정부에서는 저개발 국가지원자금(USAID)으로 인도, 인도네시아 등으로 판매하여 양수, 정미소 등의 자가발전에 이용하였고, 바이오매스뿐만 아니라 톱밥을 열원으로 사용한 스텔링엔진/발전기도 개발하여 발전출력 3.5 kWe, 발전효율 32%를 달성하였다. 또한 폐열회수 및 재생기를 부착하여 발전 출력 7 kWe 까지 향상시켰다.

(4) 수송 분야

Philips(네델란드)사가 1953년에 발명한 Rhombic driving displacer 방식의 스텔링엔진은 1960년대를 중심으로 개발이 진전되고, 단기적으로 출력 수 kW에서부터 4기통 구성의 265 kW 까지 시제품을 제작하였다.

이 중 출력 150 kW의 4 - 235형은 버스나 보트에 탑재되었으며, 1957년에 GM, 1967년에 서독의 MAN/MWM, 1968년에 스웨덴의 United Stirling Engine(USAB)사에 기술이 제공되어 발전의 계기가 되었다.

한편 미국에서는 1978 - 1987년 사이에 기존

승용차 엔진을 대체할 스텔링 엔진 개발을 추진하여 운송차량에 장착하여 시험 운전을 하였으나, 상용화 단계에 이르지지는 못하였다.

Fig 10은 승용차용으로 개발된 스텔링엔진을 보여주고 있다.

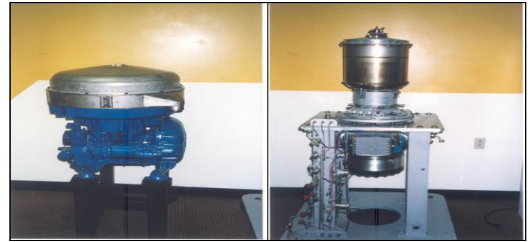


Fig. 10 Stirling engine for automobile(USA)

일본에서는 Moon light 에너지절약기술 개발 프로그램으로 1982년부터 범용 스텔링 엔진 개발에 착수하여 승용차 적용을 검토하였으나 Zero-Emission 전기자동차 개발 논리에 밀려 더 이상 진전이 없었다.

스웨덴에서는 잠수함, 심해 탐사선 등의 추진 동력원(Kockums, 75 kW급)으로 스텔링엔진을 상용화 하였으며, 보트 및 군사용 개인 휴대 동력 등에 활용 중에 있다. Fig. 11은 Kockums사에서 개발한 잠수함용 스텔링엔진을 보여주고 있다.

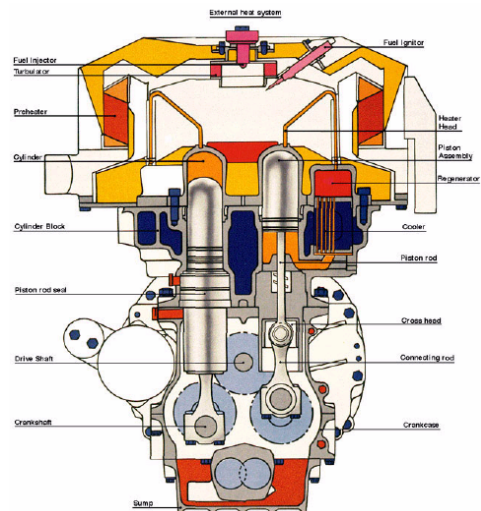


Fig. 11 Stirling engine for submarine(Kockums)

(5) 기타 응용 분야

스털링엔진의 그 외 응용분야로써는 수 kW급은 군사 보조전원용으로 그리고 수십 W의 소용량은 미래병사체계용 전원(Sunpower, 미)으로 개발되었다.

또한 미국을 포함한 우주 강국들은 우주탐사 및 인공위성용 전원에도 널리 활용하고 있다.

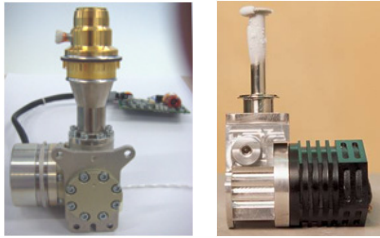


Fig. 12 Stirling cryocooler for infrared detector system(KIMM)

그리고 스텔링엔진의 역사이클인 스텔링 극저온 냉동기는 적외선센서 냉각용 극저온 냉동기 및 초전도체 냉각용으로 널리 이용되고 있다. 극저온 냉동기 분야에서는 한국기계연구원에서도 활발히 연구를 진행하여 2009년에는 전차장 및 포수조준경용 스텔링 극저온냉동기를 개발하여 적외선 열영상장비에 활용되고 있다. Fig. 12는 한국기계연구원에서 개발한 전차 및 주야관측장비용 스텔링 극저온냉동기를 보여주고 있다.

2.3 스텔링엔진/발전기의 성능향상 방안

스털링엔진/발전기는 기구적으로 간단한 자유피스톤 방식으로 개발이 활발하기 때문에 선형발전기에 대한 설계, 제작 능력이 무엇보다 중요하다, 또한 자유피스톤 방식이기 때문에 공진 설계와, 무윤활 방식을 위한 베어링 기술이 중요하다.

따라서 본 절에서는 한국기계연구원에서 가정용 열병합 발전용으로 개발한 1 kW급 스텔링엔진/발전기의 개발경험을 바탕으로 성능 향상을 위한 방안을 제시하고자 한다.

자유피스톤 방식의 스텔링엔진/발전기는 하나의 실린더에 왕복 피스톤, 왕복 변위기와 선형발전기로 구성된다. 왕복변위기를 가로질러 온도차를

를 유지하고 질량-스프링 시스템에 의해 공진주파수로 작동한다. 그리고 전원 출력은 선형발전기를 통해 발생된다. 왕복변위기를 가로질러 온도차를 유지하고 질량-스프링 시스템에 의해 공진주파수로 작동한다.

Fig. 13은 자유피스톤 방식의 스텔링엔진/발전기의 구조를 보여주고 있으며, Fig. 14는 한국기계연구원에서 개발한 전기출력 1 kW급 양방향 자유피스톤 방식의 스텔링엔진/발전기를 보여주고 있다.

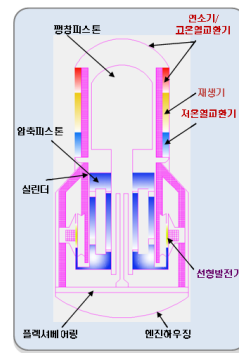


Fig. 13 Schematic diagram of the Stirling engine

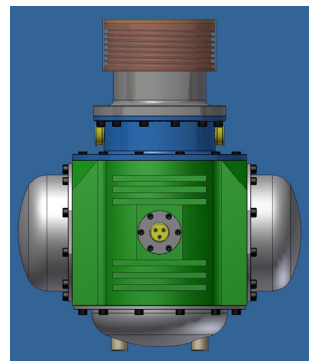


Fig. 14 Dual acting Stirling engine/Alternator(KIMM)

자유피스톤 방식의 스텔링엔진/발전기의 성능향상은 각 부품의 설계 및 제조공정에 크게 영향을 받으며, 특히 피스톤과 실린더 사이의 간극을 최소화하기 위한 피스톤 실링 기술이 매우 중요하다. 이에 자유피스톤 스텔링엔진/발전기의 성능향상방안을 다음과 같이 제안하고자 한다.

- (1) 진동 및 소음 저감을 위한 구조 설계 기술
- (2) 스텔링엔진과 선형발전기의 동적 거동을 고려한 융합설계 기술 향상
- (3) 피스톤 및 왕복기 표면 coating 기술 향상
- (4) 피스톤, 왕복기와 실린더 사이의 마찰 최소화
- (5) 작동가스의 사용적 최소화 기술

### 3. 결 론

이상으로 스텔링엔진의 구성 및 작동원리와 국내외 개발현황 및 응용분야를 살펴보았고, 국내 개발 과정을 통해 성능향상 방안에 대해 서술하였다.

스털링 엔진은 열에너지 및 환경문제를 고려하면 여러 분야에 활용 가능한 엔진으로서 자리 잡아 열병합 발전 및 태양열 발전시스템에 강점을 가지고 있으나, 자동차 등 육상 수송용으로는 내구성과 가격에서의 단점 때문에 실용화 수준까지는 상당한 어려움이 있을 것으로 예상된다.

다만, 저소음이 요구되는 잠수함이나 우주탐사 및 미래병사체계용 전원, 그리고 액체질소 제조 및 초전도체 냉각용 극저온 냉동기에 응용은 실증 연구가 있어 활용도가 높을 것으로 판단되고, 향후 스텔링엔진/발전기에 대한 국내 개발을 활성화 하여 외국기업의 국내 시장 잠식에 대비해야 하고, 해외시장 개척에도 힘써야 할 것으로 판단된다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부 전략기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### References

1. D. J. Shendage, S. B. Kedare, S.L. Bapat, 2011, "An analysis of beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism", Renewable Energy, Vol. 36, pp. 289-297.
2. W. Graham, 1980, "Stirling Engines", Oxford

- University Press.
3. N. W. Lane and W. T. Beale, 1997, "Free-piston Stirling Design Feature", presented at the 8th Int. Stirling Engine Conference, May 27-30, Univ. of Ancona, Italy.
4. H. W. Brandhorst and P. A. Chapman Jr., 2009, "New 5 kW free-piston Stirling space convertor developments", Gedeon Associates, Atens, OH.
5. J. G. Wood and N. Lane, 2003, "Advanced 35 W Free-Piston Stirling Engine for Space Power Applications", AIP Conference Proceedings, USA, pp. 1-6.
6. H. W. Brandhorst Jr., P. A. Chapman Jr., 2008, "New 5 kW free-piston Stirling space convertor developments", Acta Astronautica 63, pp. 342-347.
7. T. Akazawa and K. Murao, 2005, "Study of Linear Alternator for Free Piston Stirling Engine", The Japan Society of Mechanical Engineers, pp. 33-34.
8. 고준석외 3인, 2014, "소형 스텔링 엔진 발전시스템 기술 개발 동향", 기계와 재료, 제 26권 1호, pp. 28-36.