

고효율 스테링 엔진의 개발 및 응용 현황

Status of High-Performance Stirling Engine Development and Application

오 박 균*, 김 창 기*
Oh, Park Kyoun, Kim, Chang Gi

1. 서 론

스테링 엔진은 1816년 로버트 스테링(R. Stirling)에 의해 발명된 밀폐형 외연 기관이다. 초기에는 왕복형 증기 기관과 더불어 구미제국에 널리 보급되었으나, 실용화 기술의 부족으로 인한 잦은 고장과 가솔린 및 디젤 엔진의 발명으로 인해 자취를 감추었다. 그 후 1938년 네덜란드의 필립스사(Philips Co.)에 의해 연구가 재개되고, 간헐적으로 진행되다가 최근에 연료의 다양화, 에너지절약, 환경보존 등에서의 강한 요구와 재료기술 및 생산기술의 진보로 인하여 이 엔진이 다시 주목되어 구미, 일본 등에서 연구 개발되고 있다. 미국에서는 1978년부터 정부적 차원에서 개발을 시작하여 일부는 상용화되어 있고, 일본에서는 1982년 이래로 계속 개발을 수행하고 있고, 그 외에도 유럽의 여러 나라들에서도 활발한 연구가 진행되고 있다.

2. 스테링 엔진의 구조, 성능 및 특성

2-1 작동원리 및 구조

스테링 엔진은 실린더내에서 연료를 연소시켜 그 연소 가스를 작동가스로 사용하는 내연기관과는 달리 실린더 내에 밀봉된 작동 가스

를 외부에서 가열, 냉각시킴에 따라 동력을 얻는 외연기관이다. 이상적인 스테링 엔진의 사이클은 그림 1의 P-V 및 T-S선도에서 보는바와 같이 2개의 등온 및 등적 행정으로 이루어져 있다. 이 엔진의 작동 원리를 그림 2의 디스플레이서형 엔진을 예로하여 설명하면 다음과 같다.

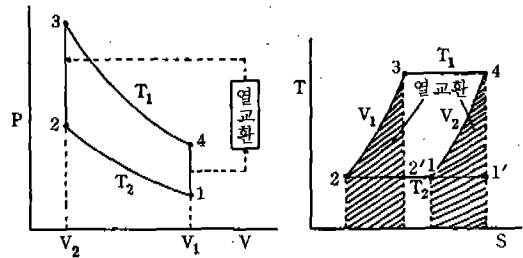


그림 1. 스테링 엔진 사이클의 PV, TS선도

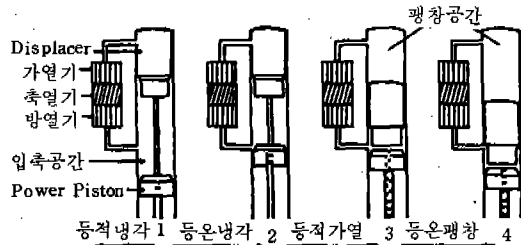


그림 2. 스테링 엔진의 작동 설명도

* 정회원 한국과학기술원 열유체 및 항공공학 연구실

(1) 등온압축과정

디스플레이서는 상사점에서 정지하고, 동력 피스톤이 상사점으로 이동하면서 압축열을 방열기로 전달하여 작동 유체의 온도를 T_2 로 유지하면서 압축하는 과정, 이때의 일량 W_{1-2} 및 방열량 Q_{1-2} 는 작동유체를 이상 가스로 가정하면 다음 식과 같다.

$$-W_{1-2} = -Q_{1-2} = \frac{mRT_2}{M} \ln(V_2/V_1) \dots (1)$$

(단, m, M 은 작동가스의 질량과 분자량, R 은 일반기체 상수임)

(2) 등적 가열과정

출력 피스톤은 상사점에서 정지하며, 디스플레이서가 출력 피스톤 윗면까지 이동하며, 이때 압축공간에 있던 작동유체는 방열기, 축열기, 가열기를 통과하여 열량 Q_{2-3} 를 받아 고온, 고압으로 등적 변화한후 팽창 공간으로 이동하는 과정

(3) 등온 팽창과정

디스플레이서와 출력 피스톤이 함께 하사점까지 이동하면서, 가열기로부터 Q_{2-3} 를 받아 작동 유체의 온도를 T_1 으로 유지하며 팽창하는 과정, 이때 발생된 일량 W_{3-4} 는 다음식과 같다. $W_{3-4} = Q_{3-4} = \frac{mRT_1}{M} \ln(V_4/V_3)$.

(4) 등적 냉각과정

출력 피스톤은 하사점에서 정지하며, 디스플레이서가 상사점까지 이동하면서, 이때 팽창 공간에 있던 작동 유체는 Q_{2-3} 와 동일한 열량을 축열기에 저장한 후 방열기를 통과하며 냉각되어 저온의 압축공간에 되돌려지는 등적변화의 과정

등적압축, 등적팽창 과정에 있어서 축열기의 온도효율을 1로 하면, 그 사이클의 열 압력은 Q_{3-4} , 출력은 $Q_{3-4} - Q_{1-2}$ 로 되어 엔진의 열효율은 다음식과 같이 카르노 효율과 일치한다.

$$\eta = \frac{Q_{3-4} - Q_{1-2}}{Q_{3-4}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

실제의 엔진에서는 축열기를 시작으로 해서 가열기, 냉각기의 비효율과 작동가스의 유동손실 등에 따라 정미효율은 상당히 낮아진다.

스터링 엔진의 기본 구성은 그림 3에 나타나 있다. 전술의 사이클 구성요소 외에 가열기에 열 에너지를 주는 연소기, 연소용공기를 배기가스에 의해 가열하는 공기 예열기, 작동가스의 외부 누설과 윤활유의 사이클내 누설을 방지하는 실링(sealing) 기구, 피스톤의 직선운동을 회전운동으로 변환하는 크랭크 기구 등을 구비하고 있다.

스터링 엔진은 그림 4와 같이 2개의 형식으로 대별된다. 디스플레이서형은 작동가스를 서로 팽창실, 압축실에 이동시키기 위한 디스플레이서(1)를 갖고, 동력은 동력 피스톤(2)에 의해 얻어내는 형식으로 되어 있다. 2-피스톤형은 팽창일을 행하는 피스톤(8)과 압축일을 행하는 피스톤(9)으로 분리해서 동력을 팽창과 압축의 차로서 행해내는 형식이다. 양형식 모두 일반적으로 소출력 엔진에 적용되나 1개의 회로구성에 2개의 피스톤이 필요하므로 마력당 중량과 용적의 관점에서 내연기관보다 불리하게 된다. 2-피스톤형의 변형인 double

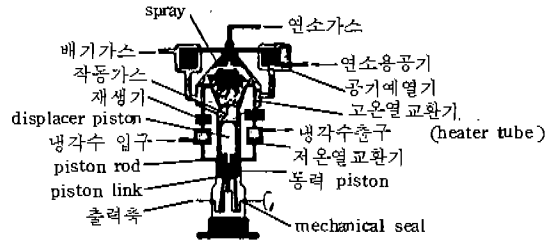
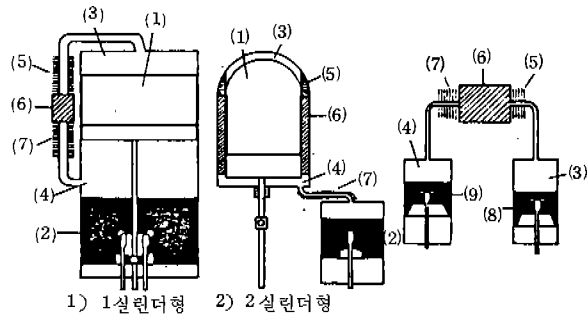


그림 3. 스테링 엔진의 기본 구성



- A) 디스플레이서형
 1) 디스프레샤 2) 파워 피스톤 3) 팽창실 4) 압축실
 5) 가열기 6) 축열기 7) 냉각기 8) 팽창 피스톤 9) 압축 피스톤
- B) 2피스톤형

그림 4. 스테링 엔진의 형식

acting 형 (linear 형)을 그림 5에 표시한다. 이것은 인접하는 피스톤의 상하를 각각의 팽창실 및 압축실로 쓰기 때문에 내연기관과 마찬가지로 1회로당 1피스톤의 구성으로 된다. 피스톤 위상차의 관계에서 이 형식은 원칙적으로 4기통으로 구성되기 때문에 소출력 엔진에서는 거의 모두 이러한 형식을 채용하고 있다. 실제의 double acting 스테어링 엔진의 단면도를 그림 6에 표시한다.

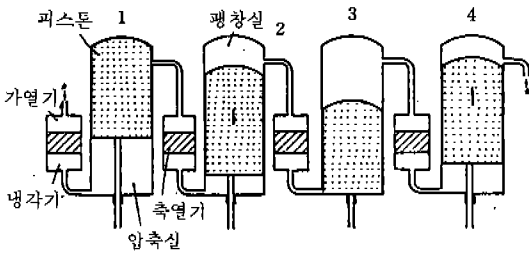


그림 5. Double Acting형 (Linear형) 스테어링 엔진

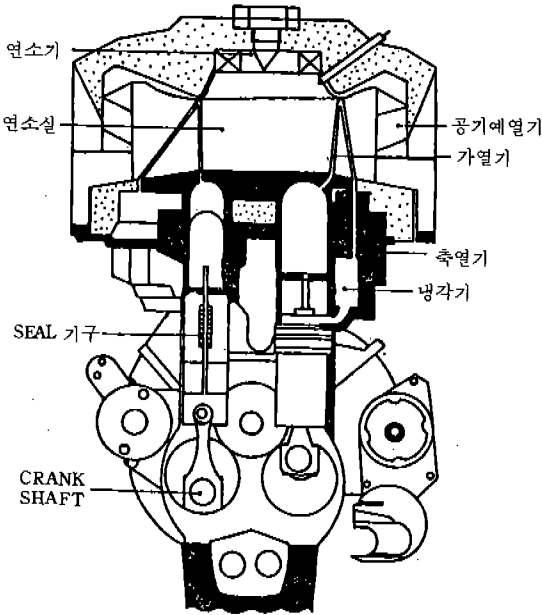


그림 6. 4기통 Double Acting형 스테어링 엔진 (유나이티드 스테어링사 P-40)

2-2 성능 및 특성

(1) 동력 성능

스테어링 엔진의 동력 성능의 일례를 그림 7에 표시한다. 저속 고토오크형 엔진이라고 말할 수 있는 점에서는 디젤 엔진과 유사하나 디젤 엔진보다도 토오크, 열효율은 높고, 그 피크 점은 저회전역에 위치하고 있다. 그림 8은 각

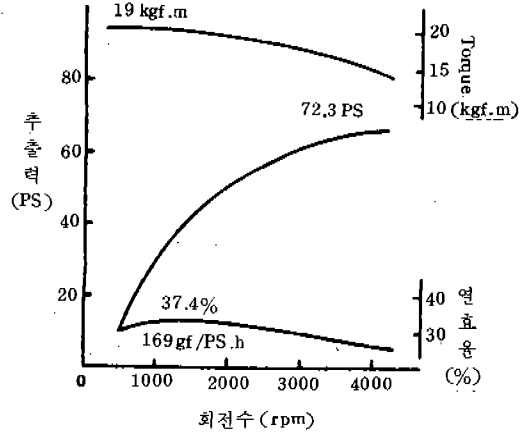


그림 7. 스테어링 엔진의 동력 성능

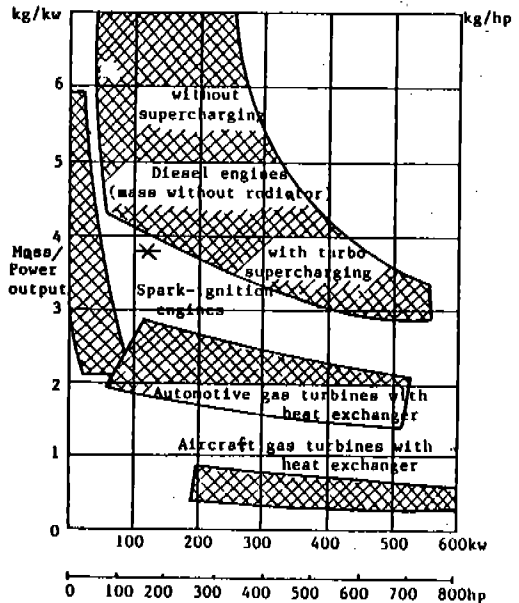


그림 8. Piston엔진과 gas turbine의 출력당 중량치의 비교

종 엔진들의 출력당 중량을 나타내는데 * 표시는 스테어링 엔진에 대한 값을 나타낸다. 그림에서 보듯이 마력당 2.5 ~ 3 kgf/PS [3.4 ~ 4.1 kgf/kw]의 범위에 있어 디젤 엔진과 같은 정도이나 작동 가스의 압력과 팽창실내 가스 온도의 상승에 따라 개선의 여지는 충분하다. 그림 9는 엔진들의 규모별 열효율을 나타내는데 소형출력에서는 스테어링 엔진의 효율이 높은 것을 알 수 있다. 자동차용 엔진의 경우는 일반 주행시의 사용이 거의 저회전역내이므로 그의 동력특성은 차량 주행성능 및 연비성능의 면에서 자동차, 특히 중차량에 적합하다고 말할 수 있다. 이 엔진의 저속형 엔진으로 되는 주된 이유는 고회전역에 있어서 작동 가스의 유동 손실이 증대되기 때문이다.

(2) 출력 제어 성능

출력 제어성능의 일례로서 엔진 회전수의 응답성을 그림 10에 표시한다. 약 1.6초에서 최

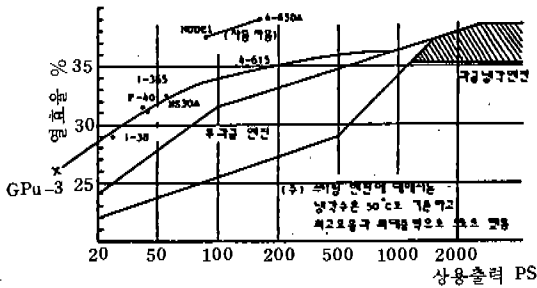


그림 9. 엔진들의 규모별 열효율

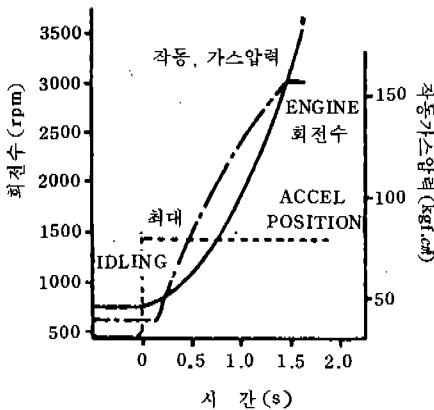


그림 10. 스테어링 엔진의 출력 제어 성능

고 회전수 3500 rpm에 달하고 있어 내연기관에 필적하는 특성을 갖고 있다. 출력 제어 방식으로는 작동가스의 압력을 변화시키는 압력 제어 방식이 쓰여지고 있으며 연료공급은 가열기의 보호 및 열효율의 양면에서 가열기의 온도를 일정하게 하도록 제어하고 있다.

(3) 시동 성능

스테어링 엔진은 직접 가열형의 내연기관과는 달리 작동 가스의 가열을 가열기로 통해서 행하므로 작동 가스 온도 상승의 시정수는 크나 그림 11에서 나타난 바와 같이 idling에 14초 정도의 시간이 필요하다. 따라서 연소는 연속 연소이므로 저온상태에 있어서 착화가 용이하고 확실한 시동이 가능하다.

(4) 진동, 소음

연속 연소이므로 작동 가스의 급격한 압력변화가 없고 토크 변동도 균소하므로 흡배기 밸브 기구가 불필요하다. 이 때문에 동일출력의 가솔린 엔진에 비해 진동은 적고 소음도 10~20dB 정도 적다. 따라서 자동차용으로서 소형 경량화를 지향하는 경우 연소용 블로어 (blower)의 고속화를 이루어야 하므로 블로어의 소음에 주의가 필요하다.

(5) 배 기

연속 연소이므로 연소가스의 체류시간이 길어 완전 연소의 달성이 용이하다. CO, HC의 배출은 본질적으로 적다. NOx의 발생은엔진

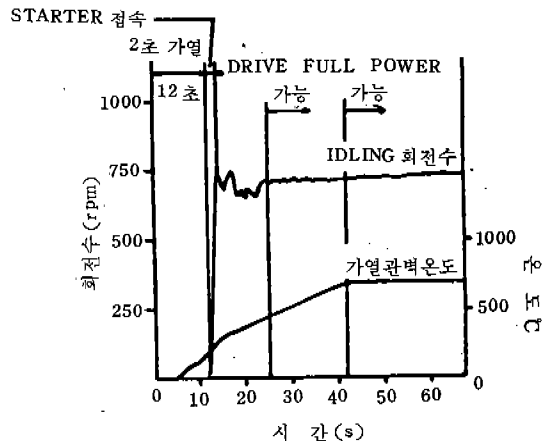


그림 11. 스테어링 엔진의 시동성능

의 효율 향상을 위해 고온 연소로 하면, 크게 늘어나나 2단 연소 또는 EGR 방식 등의 간단한 대책에 따라 가솔린 엔진이하로 낮출 수가 있다.

3. 스테링 엔진의 개발 동향

3-1 개발 동향

미국은 DOC(에너지성)에서 1978년 이래로 1.6억 \$을 스테링 엔진개발에 투자해 왔는데 그림 12는 엔진 성능치로서 개발 추세를 나타내고 있다. 그림에서 P-40형 엔진에 있어서의 최고 효율(peak efficiency)은 13.4 lb/hp이다. 이 엔진은 설계 개선 정도를 측정하기 위한 기본 모델로서 1978년 USAB에 의해 제시된 것으로 트윈(twin) 크랭크축 구동형으로 2개의 캐니스터(cannister) 재생기와 2개의 냉각기를 갖는다. Mod I엔진에 있어서의 최고 효율은 36.8%, 최대 축출력은 60kw(80hp), 마력당 중량은 10.4 lb/hp이다. 이 엔진은 전통적인 트윈 크랭크축구동계로 다층 블록(bl-

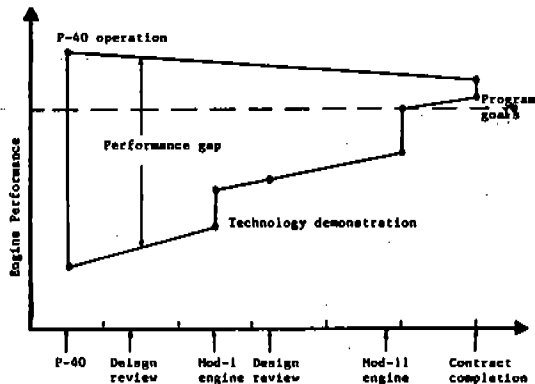


그림 12. 미국의 엔진 성능치에 따른 개발추세

ock)과 싱글 캐니스터형 재생기를 가지고 있고 가열기 온도는 720°C에서 820°C로 증가된다. Mod II엔진에 있어서 최고 효율은 42.2%, 최대 축출력은 60kw(80hp), 마력당 중량은 5.5 lb/hp이다. 이 엔진은 싱글 크랭크축을 갖고 제작비, 마력당 중량을 낮추기 위해 주조 엔진과 환상의 재생기, 냉각기로 구성되어 있다. 일본은 통산성 공업 기술원의 Moon

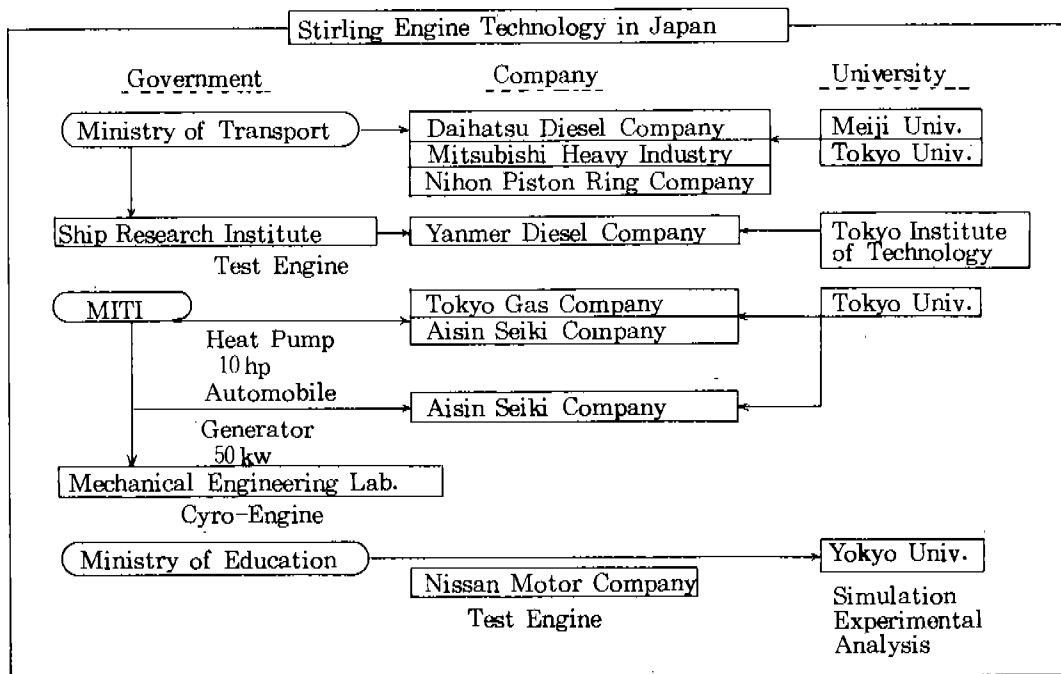


그림 13. 일본의 스테링 엔진 개발

-Light 계획에 따라 총 예산 약 600억원 규모로 1982년도부터 6개년 계획으로 시작되었다. 그림 13은 일본의 스테링 엔진 개발을 보여준다. 국내에서는 이 분야에 대한 별다른 진전이 없으나 1988년부터 고효율 열기관 연소기술개발중 스테링 엔진 설계 기초 및 경제성을 위주로 장기 중점과제로 과기원 및 기계연구소(선박분소)를 중심으로 추진될 전망이다.

3-2 주요 개발과제 - Free Piston Stirling Engine (FPSE)

스테링 사이클의 가장 새로운 응용분야들중의 하나가 FPSE인데 이것은 가장 당면한 가능성을 가지고 있다. 기본적인 FPSE는 1960년 초반에 Ohio대학의 William T. Beale에 의해 개발되었는데, 그 일례를 그림 14에 표시했다. 이 엔진은 수직형 실린더속의 위쪽에 displacer piston(DP), 아래쪽에 power piston(PP)을 배치하고 PP아래쪽에 가스 공간을 두고 가스 스프링실로서 탄성을 갖게 하고 크랭크 등의 동작을 조절하지 않고 양 피스톤이 자유롭게 통상의 크랭크엔진과 같은 작동방법과 위상차를 갖고 상하 진동상태로 작동하는 것이다. 이 때 위쪽의 DP쪽이 아래쪽으로 움직이고, 시스템 내부의 압력이 내려가면 아래쪽으로 움직이나 가벼운 DP는 항상 무거운 PP를 선행하는 형식으로 움직이므로 위상차가 생겨서 양자의 무게와 직경과 가스 스프링실의 크기를 적절히 선정하거나 조정하여 공진점에 가까운 진동수로서 양자가 움직이게 하여 정상작동상태를 얻는다. FPSE는 가열원 으로서는 석유, 가스, solar energy, pipe 등을 사용하고 출력단에 왕복형 펌프, 선형 교류 발전기, 왕복형 증기 압축기, cryocooler 등과 병용하여 다음의 3가지 용도로 사용된다.

1) 유체를 pumping
 2) 전기를 발생
 3) 열을 pumping

FPSE는 무축 동력 발생 장치로서 다음의 장점을 가진다.

- 1) 순간적으로 높은 과하중 수용 능력
- 2) 엔진과 하중사이의 에너지를 효과적으로 완충
- 3) 왕복 요소들을 위한 가스 베어링 지지 기구를 사용함으로써 윤활유없이 작동
- 4) 등은 작동실, 완전 동적 평형, 밀봉 장치 등의 설계 용이
- 5) 위상, 행정 및 평균 압력의 기계적변화 없이 작동

FPSE의 Kinematic 스테링 엔진에 대한 우월성은 다음과 같다.

- 1) 기계적, 밀봉 장치가 없기 때문에 고효율
- 2) 설계적 단순성으로 인한 낮은 제작비
- 3) Crankcase seals, non-rubbing 왕복 요소장치가 없기 때문에 낮은 보수 유지비
- 4) 작고 가볍다.
- 5) 자기동성(self-starting), self-modulation으로 인해 단순한 작동가능

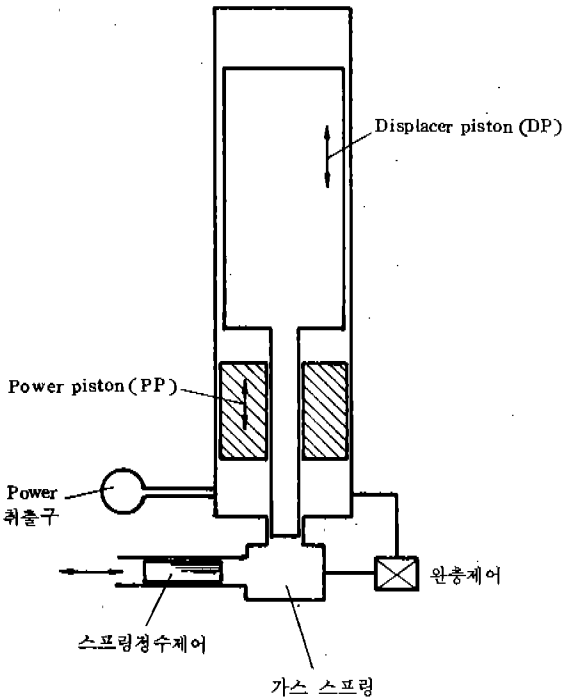


그림 14. Free Piston Stirling Engine의 기본 구조

6) 작동 공간의 등온성 유지가 쉽고 재생기를 포함하는 디스플레이서를 사용할 수 있다.

이러한 FPSE는 타엔진에 비해서 더 높은 효율을 갖는데 그림 15은 이를 잘 나타내고 있다. FPSE는 열적으로 활성화된 heat pump, 태양열 전기 converter, 원거리 동력발생기, 종합 에너지 시스템, 워터펌프 등에 사용되기 위해 현재 개발되었거나 개발중에 있고 특히 미국에서 Sunpower, GE 등의 기업체들이 활발한 연구를 진행하고 있다.

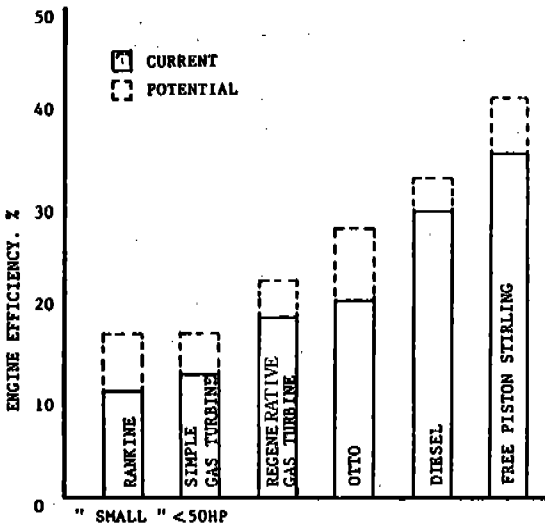
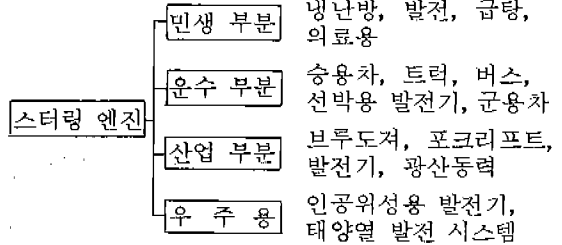


그림 15. 다른 엔진과 Free Piston Stirling Engine의 효율 비교

4. 결 론

열에너지 및 환경문제의 대응이 시급한 오늘날, 스테어링 엔진은 장점을 잘 활용하면 아래와 같이 여러 분야에 걸쳐 사용될 수 있는 엔진이다.



그러나 지금 또는 앞으로 개발이 완료될 내연기관과 결합하여 실용화시키기 위해서는 스테어링 엔진의 개발은 아직도 많은 문제점을 안고 있다. 특히 실용화의 저해 요인으로는 내구성과 가격의 양면이 거론되고 있다. 소형경량화의 요구를 만족시키기 위해서는 작동가스로서 고압(100 kg/cm(9.8 Mpa)전후)의 저분자 가스(헬륨, 수소)의 사용이 불가피하다. 이에 대한 씰링 기구, 또한 가열기를 구성하는 다수의 세관의 내구성이 문제가 된다. 가격면에서는 가열기와 공기 예열기 등이 연속 고온분위기중에서 사용되므로 다량의 내열 합금의 사용이 필요하다. 값싼 가격의 내열 재료(내열 합금, 세라믹 등)의 출현이 없는 한 디젤 엔진보다 비싼 가격이 될것으로 전망된다. 따라서 내구성, 가격의 양면에서의 해결이 실용화의 관건이나 이 엔진의 장점을 충분히 살리는 용도에서부터 보급을 행하면 그 가능성은 충분하다고 보여진다. 자동차 관련의 용도로서는 고효율, 저공해 및 동력 특성에 착안해서 도시버스, 산업차량 등에의 개발전망이 유망하며 장래에의 승용차에의 적용도 충분히 가능할 것이다. 현재로는 스테어링 엔진의 단기적 보급은 곤란하나, 에너지 및 환경문제를 고려한 장기적인 안목에서 이의 개발이 시급하다.

— 정 정 —

학회지 제 9 권 제 5 호, 제 1 page에 게재된 “한국 자동차공업의 전망”의 내용중 일부를 아래와 같이 정정합니다.

- (1) 좌단 9행의 “신진 자동차는 일본의 Toyota와 합작으로 “가” 신진자동차는 일본의 Toyota와 기술제휴하여”로,
- (2) 좌단 17행의 “1971년 신진은 Toyota의 주식을 팔아 GM과 합작회사가 되었다.”는 “1972년 6월 신진자동차와 GM은 50:50의 비율로 합작투자에 합의하여 GM Korea라는 회사를 세웠다”로 정정합니다.