

이연식 스테링 열펌프

Duplex Stirling Heat Pump

최 헌 오
H. O. Choi
한국기계연구원



- 1955년생
- 열유체 전공으로 극저온냉동기, Non-CFC 대체냉동기, 공조기기, 대기오염방지기기 개발에 관심을 가지고 있다.

박 성 제
S. J. Park
한국기계연구원



- 1962년생
- 열유체 전공으로 극저온발생장치 Non-CFC 냉동기 개발에 관심이 있다.

1. 서 론

최근 미국, 일본, 일부 유럽 등지의 선진국에서는 저공해, 저소음, 고효율을 가진 스테링엔진을 이용하여 소형발전기, 실험비행기, 인공심장, 자동차용 엔진 및 열펌프 시스템용 동력 엔진등에 이용하고 있으며, 스테링 냉동기를 이용하여 슈퍼컴퓨터와 적외선 센서의 냉각과 같은 첨단과학과 우주산업등에 응용함으로써 실용화에 박차를 가하고 있다. 특히 민생에 밀접한 상품화로서, 열펌프 자유디스플레이사용 스테링엔진에 대해서는 일본에서 moonlight 계획에 의해 1977년부터 기초연구에 착수하여 1992년에는 연구개발 완성함으로써 1993년에 실용화 추진을 서두르고 있고, 미국에서는 1960년대초에 자유피스톤 스테링엔진 기술을 발전시켜, 1979년에 Sunpower사에 의

해 이연식 자유피스톤 스테링엔진 개념에 의한 천연가스 액화기와 주거용 열펌프의 개발이 시작되었다.

이연식 스테링머신은 스테링 엔진에 의해 스테링 사이클 열펌프가 작동되는 장치로써 다른 기존의 열펌프에 비해 기술적으로 많은 장점을 지니고 있다. 이연식 스테링 열펌프의 주요 구성품인 자유피스톤과 자유디스플레이서는 하나의 실린더 안에서 3개의 동작부로 나누고, 엔진과 열펌프의 양쪽에 같은 작동유체가 사용된다. 이와같이 자유피스톤 스테링엔진들로 이루어진 이연식 스테링머신의 기본적인 장점은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 구조의 간단성-기계적 구동장치가 없이 3개의 동작부만 존재
- 2) 고효율-Carnot 사이클의 효율과 동일한

스터링 사이클을 사용

- 3) 저소음-외연기관이기 때문에 연속연소에 의한 소음 감소
- 4) 다중연료 사용가능-외연기관이기 때문에 석유계 연료이외에 태양열, 산업배열, 농업용 폐기물, 천연가스등의 다중 열원의 사용이 가능하여 에너지 절약에 기여
- 5) 저공해-석유계 연료를 사용할 경우에도 외연기관이기 때문에 우수한 연소장치가 사용되면 NO_x나 SO_x등의 유해성분을 극히 감소시킬 수 있음
- 6) 자가시동-자유피스톤과 디스플레이서를 사용하므로, 고온과 저온측 열교환기 사이에 온도차가 발생하면 자동적으로 작동
- 7) 수명이 길다-동작실링을 사용하지 않고, 고압으로 유지되는 헬메틱 실링안에 피스톤과 디스플레이서들이 포함되어 있기 때문에 장시간 운전 가능

특히 이연식 스테링 열펌프(DSHP)는 냉매가스가 Non-CFC인 헬륨가스를 사용함으로써 최근 전세계적으로 문제가 되고 있는 프레온 가스의 오존층 파괴와 지구온난화에 대한 대책으로 급부상하리라 예상된다. 이와같이 이연식 스테링 열펌프는 환경오염 문제와 에너지절약 차원에서 가정용 냉동, 냉난방기, 일반 공조시스템의 사용뿐만 아니라 하절기에 피크를 보이는 전력 수요의 절감으로 전력 평준화등에 활용할 수 있는 등 그 응용분야는 다양하리라 기대된다.

따라서 본 연구에서는 스테링 엔진에 관해 개략적으로 설명한 후, 이연식 스테링 열펌프의 구성 및 작동원리를 정리하고 미국, 일본등 국외에서의 개발현황과 국내의 기술현황을 고찰해 보고자 한다.

2. 스테링 엔진

19세기초 유럽 지역에서 계속 발생된 보일러의 폭발사고로부터 인명피해를 줄이기 위해 보일러가 필요없는 엔진을 만들고자 하는 휴머니즘으로부터 1816년 스코틀랜드의 목사 Robert Stirling이 발명한 스테링 엔진은 외연기관으로서 이

론적으로는 Carnot 사이클의 효율과 같기 때문에 “꿈의 엔진”으로 각광을 받았지만 내연기관의 발명과 발전에 의해 1973년 제1차 오일쇼크가 일어날 때까지 거의 쇠퇴해 갔었다. 제1차 오일쇼크는 지구 자원의 한계를 인식하게 되었고, 외연기관인 스테링 엔진은 다중연료 사용가능, 고효율, 저공해, 저소음의 장점에 의해 다시 주목을 받기 시작하여 인공심장, 우주개발, 태양열 이용 시스템등의 극히 일부 첨단분야의 열기관에 연구가 집중되었고, 그후 초전도산업 및 군사, 천문과학장비 센서의 냉각용으로 극저온 냉동기가 개발되었다.이와 동시에 최근에는 자동차, 냉동, 발전, 열펌프등 민생용으로서의 실용화, 상품화가 크게 진전되었다.

스터링 엔진의 또 커다란 발전의 하나는 1950년대 말경 미국 Ohio 주립대학 Beale 교수가 발명한 자유피스톤 스테링엔진이다. 자유피스톤 스테링엔진은 열역학 사이클을 형성하는 왕복장치의 운동이 작동유체압과 핵심부품 요소들의 유체 동력학적인 상호작용에 의해 이루어진다. 따라서 피스톤이나 디스플레이서에 연결되는 기계적 연결부가 필요없게 되어 헬메틱실링이 가능하기 때문에 누출이 없고, 구조가 간단하며, 저렴하고, 자가시동이 되며, 수명이 긴것 등의 많은 장점이 두드러지게 되었다. 이러한 특징에 의해 열압축 열펌프, 태양광 이용 발전 시스템, 벽지나 오지의 발전장치와 물펌프 등에 이용이 가능하게 되었다. 그림1은 스테링 엔진의 작동원리를 나타낸 개략도이다.

스터링 엔진의 작동원리는 실린더에 봉입된 고압의 작동가스(헬륨)를 실린더 외부로부터 연소등에 의해 가열 팽창시켜 출력 피스톤이 하강하도록 한다. 다음에 작동가스의 압력을 외부냉각에 의해 저하시킴과 동시에 출력 피스톤의 상승에 의해 작동가스를 압축한다. 이상의 팽창·압축의 동작을 작동가스를 매개로 하여 연속적으로 반복해서 출력축을 구동하는 것이다. 이 사이클은 두개의 등적과정과 등온과정으로 이루어지고, 그림2에 나타낸 스테링 사이클의 PV선도의 등적변화 CD에서 작동유체로부터 배출된 열에너지는 외부에 손실없이 축열기에 저장되어

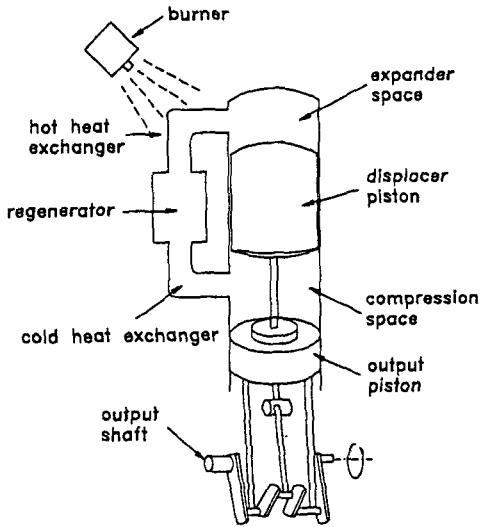


그림 1 스테링 엔진의 작동원리

다음의 등적변화 AB의 과정에서 작동유체에 되돌아 온다. 따라서 이론 열효율은 Carnot 효율과 같이

$$\eta_c = \frac{T_H - T_C}{T_H}$$

가 되어 T_C 에 대해 T_H 를 충분히 고온으로 함으로써 높은 열효율을 얻을 수 있다. 실제 기관에서는 작동유체의 유동저항이나 엔진 표면으로부터의 열 누출때문에 이론대로의 효율을 얻을 수 없지만 각 요소가 적절히 설계되면 35~40%의 높은 열효율을 얻을 수 있다.

3. 이연식 스테링 열펌프의 구성 및 작동 원리

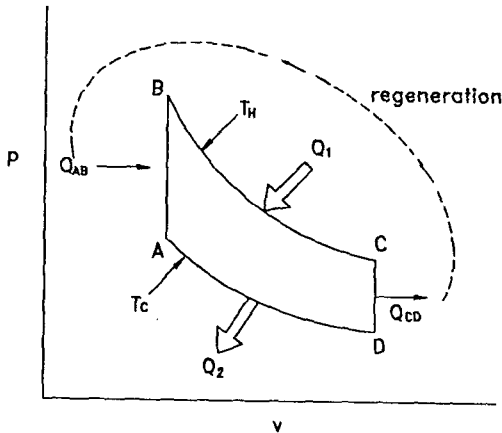


그림 2 스테링 사이클의 PV 선도

DSHP는 압력 실린더내에 공용의 디스플레이서에 의해 나누어진 두개의 자유피스톤 스테링 머신으로 구성되어 있다. 하나의 디스플레이서와 공용 피스톤의 한쌍으로 이루어진 작동 사이클은 열기관으로서 작동하며 다른 한쌍의 공용 피스톤과 디스플레이서로 이루어진 열펌프 사이클을 구동한다. 그림3은 DSHP의 개념도를 나타내고 있다.

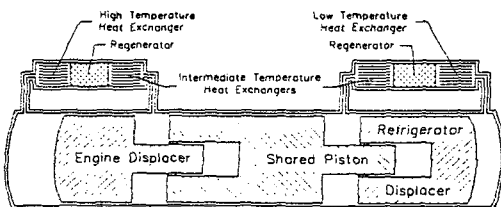


그림 3 이연식 스테링 열펌프의 개념도

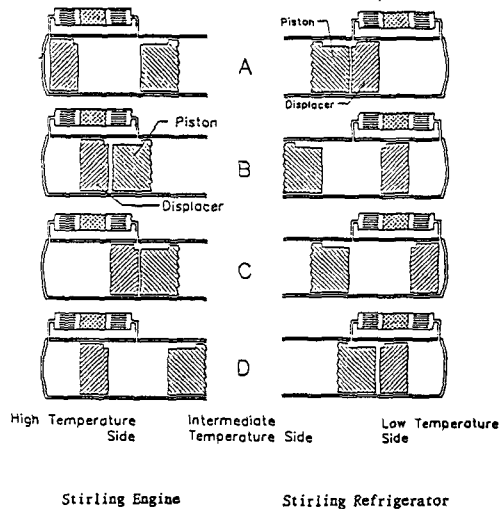


그림 4 이연식 스테링 열펌프의 작동원리도

DSHP의 설계상 특징은 두개의 스테어링머신이 공통의 피스톤에 의해 작동됨으로써 단지 3개의 동작 요소만 가지고 있는 것이다. 작동원리로는 엔진을 태양열, 가스의 연소열, 폐열, 전기등의 구동원으로 가열하여 작동요소(엔진부분과 냉동부 부분 사이의 피스톤)에 에너지를 저장하고, 이를 이용해서 냉동부분을 압축, 팽창시켜 냉각력과 열펌프 효과를 얻는 기계적 압축장치이다. 따라서 결과적으로 DSHP 시스템은 자유피스톤 스테어링 엔진의 모든 장점을 그대로 유지하여 고효율이고 구조가 간단하며, 내구성이 강한 열구동 열펌프가 된다. 그림4는 DSHP의 작동원리도를 나타내고 있는데, 작동과정은 다음과 같다.

3.1 A-B 과정

엔진의 디스플레이서는 가장 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하고, 피스톤은 중간에서 왼쪽으로 이동하여 엔진의 작동유체를 기계적으로 압축함으로써, 쿨러를 통하여 가스를 밀어내면서 중간 온도부에서 열을 방출한다. 이때 작동유체는 디스플레이서의 오른쪽 중간 온도부에서 재생기를 거치면서 열을 흡수하고, 고온부로 들어가 히터에 의해 고온이 된다.

동시에 냉동기의 디스플레이서 가장 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하여, 냉동기의 저온부 작동유체를 칠러를 통하여 밀어내어 열을 흡수하고, 또한 작동유체는 재생기에서 열을 흡수하여 중간 온도부로 이동한다.

3.2 B-C 과정

엔진의 디스플레이서와 피스톤은 동시에 오른쪽으로 이동하여 고온부 공간을 팽창시키고, 가스는 단일팽창에 의해 온도가 떨어지며, C-D 과정에서 열을 흡수하게 된다. 이때 피스톤에 작용하는 작동유체에 의해 열을 발생하고 냉동기의 작동유체 압력에 반하여 오른쪽으로 이동한다.

냉동기에서는 피스톤이 작동유체를 압축시키기 시작하여 디스플레이서에 의해 중간 온도부로의 작동유체의 이동이 완료된다. 이 압축열은 C-D 과정에서 열교환기를 통하여 방출된다.

3.3 C-D 과정

엔진의 디스플레이서는 왼쪽으로 이동하여, 작동유체가 재생기를 통하여 고온부에서 저온부로 이동하도록 한다. 이때 작동유체는 B-C 과정에서 단일팽창하여 온도가 낮아졌기 때문에 히터에서 열을 흡수하고 재생기를 통할 때 A-B 과정에서 흡수할 열을 방출하게 된다.

냉동기에서는 압축행정을 완료하고 디스플레이서는 왼쪽으로 이동함으로써, 작동유체는 중간 온도부에서 저온부로 이동한다. 이때 작동유체는 B-C 과정에서 단일압축되어 온도가 높아졌기 때문에 열교환기에서 열을 방출하고, 재생기에 열을 주고 저온부로 돌아간다.

3.4 D-A 과정

엔진에서 디스플레이서는 왼쪽으로 이동하여 모든 작동유체를 중간 온도부로 이동시키고, 피스톤은 왼쪽으로 이동하여 엔진부의 체적을 감소시키며 왼쪽으로 이동하여 작동유체를 압축하기 시작한다. 작동유체는 중간온도부에서 압축열을 방출함으로써 엔진사이클을 완료한다.

냉동기에서는 피스톤이 왼쪽으로 이동함에 따라 냉동부의 작동유체를 팽창시키고, 작동유체는 온도가 감소하여 칠러를 통하여 열을 흡수하게 됨으로써 냉동사이클을 완료한다.

전체 사이클의 B-C-D 과정에서 엔진은 일을 발생하고 냉동기는 일을 흡수하며, D-A-B 과정에서 엔진은 일을 흡수하고, 냉동기는 일을 발생한다. 이때 엔진부에서 엔진의 평균온도는 팽창시에 더 높기 때문에 D-A-B 엔진압축과정시 흡수일보다 B-C-D 엔진팽창과정시의 팽창일이 더 크다.

4. 이연식 스테어링 머신

스테어링 엔진을 이용한 열펌프의 개발은 미국의 경우 Sunpower사 및 MTI사를 중심으로 DSHP에 집중하고 있는 반면에, 일본의 경우는 monlight 계획의 일환으로 열펌프용 스테어링 엔진 개발에 집중하고 있다. 이외에 덴마크등 일부 유럽 국가들에서도 에너지 절약과 환경오염의 방지의

해결을 목표로 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 따라서 DSHP와 관련된 연구개발 현황과 국내의 기술현황을 고찰해 보고자 한다.

4.1 Sunpower사의 이연식 스텀링 머신개발 (미국)

Sunpower사는 1979년부터 DSHP에 관한 연구 개발에 착수하여 현재 대략 3가지 방향에서 검토, 실용화되고 있는데, 주로 천연가스 액화기, 주거용 열펌프, 냉동기(freezer)에 관한 것이다.

4.1.1 천연가스액화기

그림5는 Sunpower사에서 제작된 천연가스액

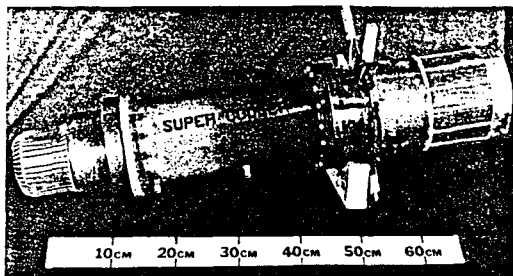


그림 5 이연식 스텀링 천연가스 액화기

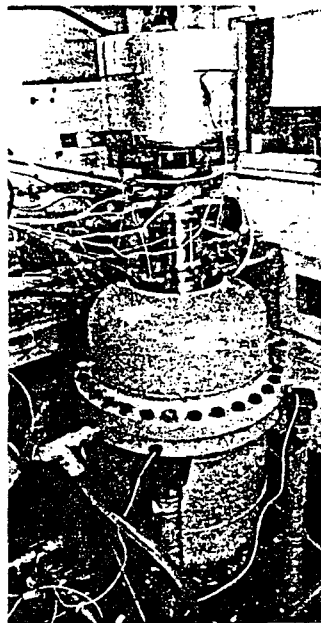


그림 7 이연식 스텀링 냉동기

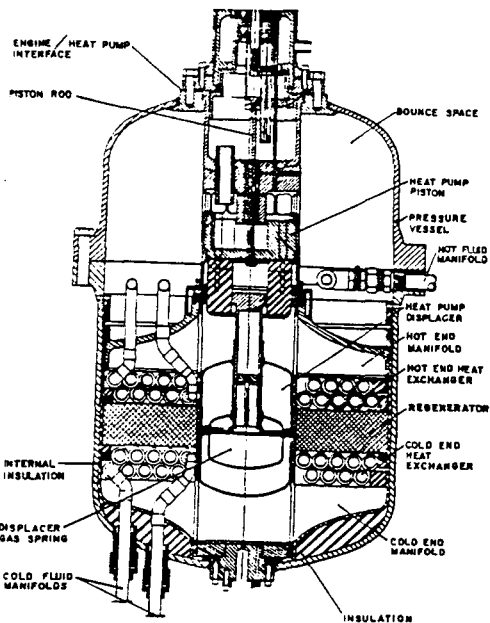


그림 6 이연식 스텀링 열펌프의 개략도

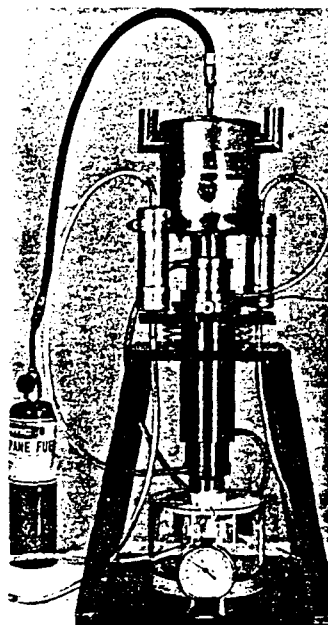


그림 8 Duplex Stirling 냉동기

화기를 보여주고 있다. 이 장치는 2.5kW의 출력을 가지는 엔진에 의해 110K의 저온에서 약 500W의 냉동능력을 가지도록 설계되었다. 천연가스액화기 개발에 의한 설계, 제작 및 실험 경험은 주거용 열펌프와 냉동기등에 응용되었다. 이 액화기는 상품화를 위한 실용화가 성취되지는 못했지만, 천연가스를 연료로 하는 자동차 실험용 소형 천연가스액화기 개발에 대한 가능성을 한층 높였다.

4.1.2 주거용 열펌프

1980년대초에 Sunpower사는 소형 가정용 DSHP(11kW or 36,000Btu/h)를 제작하여 시험하였다. 그림6과 그림7은 개발된 DSHP 장치의 개략도 및 사진을 보여주고 있다. 이 장치는 50°C의 온도상승에 Carnot COP_n의 50%에 도달했다. 실제 주거용으로서 요구되는 더 낮은 온도차에 대해서는 더 높은 효율을 가지는 DSHP가 가능하다고 보고되고 있다.

4.1.3 주거용 냉동기

자유피스톤 DSHP는 식품 냉동기(약 40W)용으로 사용되어 구조를 간단히 하고 신뢰성을 크게 높일 수 있다. 그림8은 이연식 스테링 냉동기를 보여주고 있다. 기계적으로 간단한 자유피스톤 장치는 식품냉동창고등에서 요구되는 약 -20°C의 냉동온도를 쉽게 얻을 수 있다. 이 이연식 스테링 냉동기는 작동이 안정되어 있고, 저소음이며 쉽게 온도 조절이 가능하였다. 또한 2000시간 이상의 작동후 검증한 결과 기계적 마모나 작동불량이 전혀 발견되지 않아 기계수명이 상당히 길며, 제작이 수월하고 유지비가 매우 작은 것으로 입증되었다.

4.2 Moonlight 계획에 의한 열펌프용 스테링 엔진 개발(일본)

일본에서는 통산산업성 공업기술원이 moonlight 계획의 일환으로 신 에너지 종합개발기구(NEDO)를 추진모체로하여 Mitsubishi, Toshiba, Aisin, Sanyo등 4개사와 국립시험연구소에 의해 총합적이고 계통적으로 열펌프용 스테링 엔진을 개발하고 있다. 이것은 DSHP보다는 스테링 엔진의 개발과 그 응용시스템에 중점을 두고 있다.

4.3 기타

덴마크공대의 Qvale Andersen 교수팀은 열기관과 열펌프가 일체로된 일체형 스테링 열펌프를 계획하여 이미 실험을 수행하였다. 이 방식은 한쪽이 엔진이고, 다른쪽이 열펌프로써 양쪽이 교차하여 결합되어 있기 때문에 시스템을 두개로 별도로 할 필요가 없어 매우 간편하고 더우기 외부 누출을 적게할 수 있는 구조를 하고 있다.

이외에 네덜란드의 Philips사등 일부 유럽에서는 스테링 사이클과 이론적으로 동등한 Vuilleumier(VM) 사이클을 이용한 VM 열펌프도 활발히 연구되고 있다.

4.4 국내기술현황

DSHP 개발은 기본적으로 자유피스톤 스테링 엔진의 설계, 제작기술이 우선되어야 한다. 미국, 일본등지에서의 실용화 단계와는 동떨어지게 국내에서는 아직 스테링 엔진 설계 및 제작기술은 크게 뒤떨어져 있는 실정이다. DSHP의 개발을 위해서는 핵심기술인 기체역학적평형 기술, 실링 기술, 엔진의 고효율 연소장치 및 쿨러 및 칠러 등의 고효율 열교환기 기술과 함께 측정 및 평가기술에 대한 기초연구가 선행되어야 한다. 현재 일부 기업체와 대학을 포함하여 한국기계연구원, 한국과학기술연구원등에서 연구개발이 시작되었지만 아직 선진국 수준까지는 요원하다 하겠다.

5. 결 론

'꿈의 엔진'이라 불리우는 스테링 엔진을 이용한 기술은 그동안 민생용과는 동떨어져서 첨단과학과 우주개발등의 엔진 및 극저온 냉동기로서 극히 일부분의 분야에서 응용되었지만 최근 주거용 열펌프 및 공조시스템등으로 응용하는 기술인 이연식 스테링 열펌프 개발에 의해 인류의 편의시설 확대 뿐만 아니라 에너지절약과 환경오염 방지 기술로서 우리의 생활공간에 훨씬 가깝게 다가왔다.

선진국에서 활발히 연구가 진행되고 있는 DSHP는 아직 실제효율면이나 경제성면에서 여

러가지 문제점이 남아 있지만, 스티어링 사이클의 장점인 고효율, 저소음, 저공해, 구조의 간단성, 다중연료 사용, 자유피스톤 기술에 의한 자가시동등에 의해 관리 및 유지가 간편하고, 수명이 길기 때문에 앞으로의 응용가능성은 무한하다고 하겠다. DSHP를 이용한 주택 및 건물의 냉난방 및 환경공해 민감한 양로원, 보육원, 병원등의 공기조화 시스템등의 개발에 산, 학, 연이 공동 참여 함으로써 앞으로 다가올 기술에 의한 국제 경쟁력 강화에 관심을 기울여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. B. Penswick, I. Urieli, 1984, "Duplex Stirling Machines", 19th IECEC.
2. David M. Berchowitz, 1982, "The Design, Development and Performance of A Duplex Stirling Natural gas Liquefier", 17th IECEC.
3. William Beale, 1984, "Low Cost Stirling Engines", 21th proceedings of Automotive Technology Development Contractors' Coordination Meeting, pp.93~96.
4. Leo O'Connor, 1992, "Stirling Machines, "Automotive Applications may take a back seat to Household Chores", Mechanical Engineering, pp.75~79.
5. Fusao Terada, etc., 1981, "Direct Drive Heat Pumps", ASHRAE Journal, pp.22~25, August 1991.
6. Jaroslav Wurm, etc., "Stirling and Vuilleumier Heat Pumps", McGraw-Hill, Inc.
7. G. Walker, 1980, "Stirling Engines", Oxford University Press.
8. 青木 毅, 1993년 중간호, "Stirling Engine Heat Pump 실용화의 전망", 省 energy, pp.15~19.
9. 近藤 正, 1986, "Stirling Engine", 省energy, Vol. 38, No.12, pp.41~48.