

Vuilleumier(VM) 사이클 열펌프

Vuilleumier Cycle Heat Pump

강 병 하
B. H. Kang
한국과학기술연구원



- 1958 년생
- 비 CFC 냉매이용 열펌프 시스템 및 스테링사이클 응용기기에 관심이있다.

1. 서 언

현 인류에게 필연적으로 대두되고 있는 과제인 에너지 절약 및 환경오염 방지의 측면에서 스테링 사이클 기기의 응용기술이 선진각국으로부터 상당한 관심을 받고 있으며 다투어 그 실용화를 서두르고 있다. 그 중에서도 주거용 혹은 사무용 건물의 냉방과 난방 그리고 급탕이 동시에 가능하며 대기온도 변화에 따라 성능 변화가 크지않고 효율 좋은 Vuilleumier(VM)사이클 열펌프(VMHP)의 개발 및 실용화에 박차를 가하고 있다.

Vuilleumier Cycle은 1918년 Rudolph Vuilleumier에 의해 열구동형 냉각기로서 고안되어 주로 극저온 영역에서의 응용에 많이 이용되어 왔다. 그러나 최근에 종래의 압축식 냉동기 및 열펌프에 사용되는 냉매인 프레온가스가 지구의 온도상승 및 오존층 파괴에 미치는 영향으로 인해 프레온 계통 냉매에 대한 세계적인 규제 조치가 있어, 그 대책의 일환으로 규제냉매가 아닌 헬륨을 사용하는 VM사이클을 공조용 냉방 및 열펌프 분야로의 응용이 적극 연구되고 있다. 그리고, 공조기기등의 운전에의해 하절기에

Peak를 보이는 전력의 수요를 저감시키기 위해, VM사이클 열펌프는 여름에 수요가 떨어지는 가스로 냉방하는 것이 가능하여 전력과 가스의 수요 평준화를 꾀할 수 있다. 이러한 장점들을 고려하여 열에너지 뿐만아니라 환경문제에 대한 대응이 시급한 오늘날 VM사이클 열펌프의 개발에 대한 선진각국의 노력은 당연하다 하겠다.

본고에서는 VM열펌프의 특징과 기본원리를 설명하고 선진각국에서 공조영역에 응용한 VM 열펌프의 연구 개발사례 및 결과를 소개하고자 한다.

2. VM사이클 열펌프의 특징

VM사이클을 공조시스템에 이용하는 경우 다음과 같은 매력적인 특징을 가지게 된다.

(1) 원리적으로는 Carnot사이클과 같은 효율이 얻어지고, 프레온냉매를 사용하는 증기압축식 열펌프에 비해 난방운전에서 외기온도 저하시 성능감소가 적으며, 높은 난방 COP를 얻을 수 있다.

(2) 작동가스가 헬륨으로 프레온을 사용하지 않기때문에 오존층 파괴와 지구온난화에 미치는

영향이 없다. 또한 가스엔진구동 열펌프와 비교해서 배기가스, 소음, 진동특성면에서 우수하다. 이는 VM사이클 열펌프에서는 연속연소이므로 유해 배기가스의 방출이 거의없고, 압력변동이 크지 않기 때문에 저소음으로서 저진동 운전이 가능하기 때문이다.

(3) 외연기관의 특징을 채택하고 있기 때문에 도시가스 이외에도 태양열, 고온배기가스, 액체연료등 폭넓은 열원을 이용할 수 있다.

3. VM사이클 열펌프의 원리

VM사이클 열펌프는 밀폐 용기내의 헬륨가스를 가열, 냉각함으로 생기는 압력변화를 이용해서, 직접 냉동 사이클을 구동함으로써 공조를 하는 것이다. 따라서 전기와 동력을 위한 에너지 변환부분이 적기 때문에 에너지의 유효이용에 큰 역할을 한다. 또한, VM사이클은 스테링 사이클과 유사하기 때문에 스테링 엔진 기술의 응용이 가능하다. 당초 초 저온용의 냉동기기의 개발에 이용되어 왔던 VM사이클을, 공조기기에 응용함에 있어서 이들의 연구 성과가 크게 활성화 되고 있다.

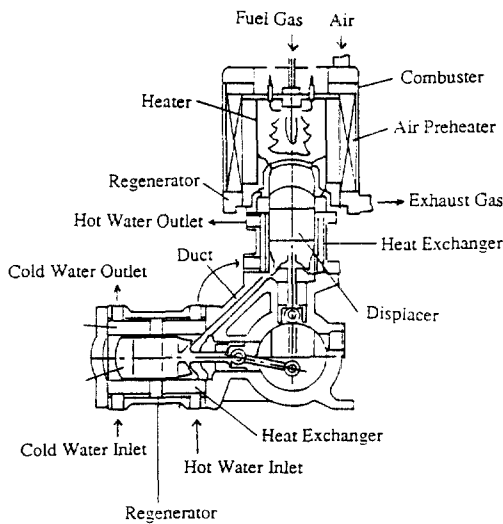


그림 1 VM사이클열펌프의 기본 구성

VM열펌프의 기본구성을 그림 1에 나타내었다. 이 그림에서와 같이 VM열펌프는 2개의 Displacer Piston과 4개의 열교환기(가열기, 중온 열교환기 2개, 냉각기) 그리고 2개의 재생기를 갖는 밀폐 용기로 구성되고, 그 내부에 작동가스로서 헬륨이 고압으로 봉입되어 있다. 재생기는 열 Trap의 역할을 하기 위함이며, 용기내 작동실은 고온공간, 중온공간, 저온공간의 3개의 온도 레벨 공간으로 나누어져 있다. 여기서 가열기의 작동가스는 연소에서 가열되고, 중온 열교환기, 냉각기를 순환하여 냉각되면서, 2개의 Displacer를 90도 위상차(고온측선행)로서 작동하면 그 움직임에 맞추어 내부의 가스가 고온측-저온측으로 이동하고, 작동실 전체의 압력이 증감한다. 따라서 고온공간과 중온공간 사이에서 압력변동이 발생하는 열압축기와 그 압력변동을 이용하여 냉열 및 난방열을 생성시키는 열펌프로 구성된다. 열압축기에는 스테링 엔진과 같이, 연소열 등에 의해 가열되는 고온공간과 냉각된 중온공간이 있으며, 작동가스는 고온공간과 중온공간사이에서 Displacer의 교반에 의해 압력변동을 일으킨다. 이 압력변동을 이용해서 역 스테링사이클을 구동시켜 열펌프측에서 냉열 및 난방열이 생성된다.

결국 VM사이클은 스테링엔진사이클과 스테링 냉동 사이클을 조합한 형태가 되는데, 그림 2에 이 VM사이클을 T-S선도에 나타내었다. 이 그림에서 사이클 I-II-III-IV는 스테링엔진 사이클이고, 사이클 I'-II'-III'-IV'는 스테링 냉동 사이클이다. 따라서 VM사이클 열펌프의 이론적 성적계수(COP)는냉방과 난방시 각각 다음식(1)과 (2)로 표시된다.

$$COP_c = T_c(T_h - T_m) / T_h(T_m - T_c) \dots \dots \dots (1)$$

$$COP_h = T_m(T_h - T_c) / T_h(T_m - T_c) \\ = 1 + COP_c \dots \dots \dots (2)$$

VM사이클 열펌프의 작동원리를 설명하기 위해 그림 2의 T-S선도의 상태와 상응되는 개념도가 그림 3에 나타나 있다. 그림 3에서 저온측 Displacer Piston이 좌단에 가면, 고온측 Displacer Piston은 위에서 아래로 움직이고, 가스는 저온으

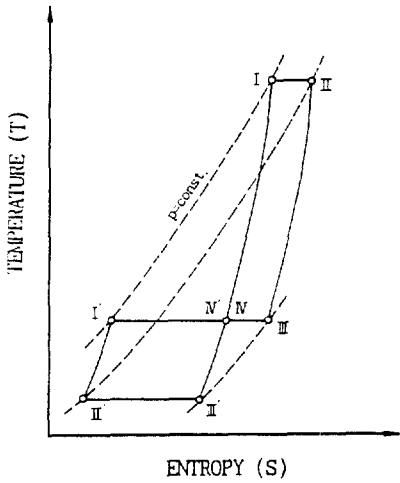


그림 2 T-S 선도상의 VM사이클

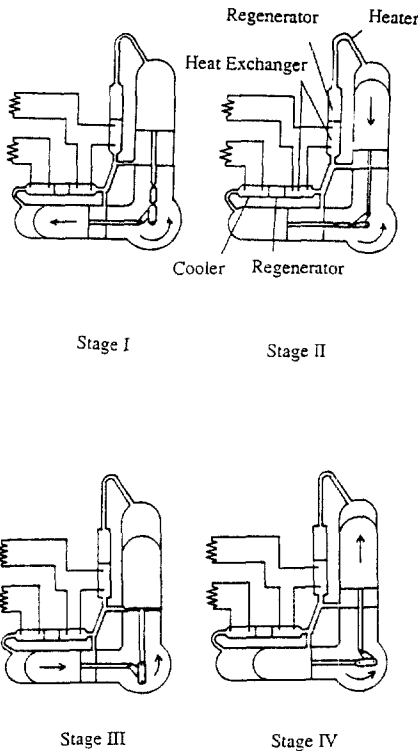


그림 3 VM사이클 열펌프의 작동

로부터 고온측으로 이동해 평균온도의 상승과 함께 전체의 압력도 상승한다. 이 압력 상승에 의해 중온공간의 온도가 올라가고, 그 열을 중온 열교환기로부터 온수의 형태로 뽑아낸다(상태 I → II). 또 저온측 Displacer Piston이 우단에 오면, 고온측 Displacer Piston이 아래에서 위로 움직여 가스는 고온측으로부터 저온측으로 이동하여, 평균온도의 하강과 함께 압력도 감소한다. 이 압력감소에 의해 저온 공간의 온도가 내려가기 때문에 냉각수로 부터 열을 빼앗는다(상태 III → IV). 비슷한 방법으로 상태 I에서는 중온 열교환기로부터 온수가 얻어지고, 상태 III에서는 가열기로 열이 들어간다. VM사이클 열펌프는 이러한 작동에 의해 냉방, 난방, 급탕이 동시에 가능하다.

4. VM열펌프의 연구개발현황

VM사이클열펌프의 연구개발 사례를 살펴보면 독일, 덴마크, 네덜란드 등 유럽북부에 위치해 있는 나라들에서는 한냉조건하에서의 난방출력에 초점을 맞춘 연구가 많은 반면, 가까운 일본에서는 하절기 도시가스를 이용한 냉방에 주안점을 두고 연구개발이 행해지고 있다. 본 절에서는 VM열펌프의 각국에서의 연구개발현황과 시작기의 특성을 소개한다.

4.1 Philips Research Laboratories (네덜란드)

1960년대 초기부터 극저온용으로 VM사이클을 이용하기 시작하여 1970년대에 여러가지 Package 형태의 극저온 냉동기를 만드는 등 많은 진전이 있었다. 그리고 1980년대에 난방을 위한 10kW급 VM사이클 열펌프를 제작, 실험하였으나 상용화에는 실패하였다. 그러나 Philips는 VM사이클 냉동기 및 열펌프의 초기연구에 선구적인 역할을 담당해 왔다.

4.2 The Technical University of Munich (독일)

뮌헨공대의 Eder교수팀은 1981년도 주거난방

용 VM열펌프의 시작기를 독일의 여러회사와 (ASK-Technische Entwicklungen of Bayreuth, PETRY of Neumarkt, Heidelberg-Motor GmbH of Starnberg) 협력하여 제작하였다. 이 시작기는 실험용으로 만들어졌기 때문에 실험의 편의상 전기로 가열하는 시스템을 채택하였다. 그 이후 주거용 난방 및 급탕을 목적으로하는 가스구동 VM열펌프를 제작 실험하여 그 결과를 1989년도에 발표하였다. 그림 4는 뮌헨공대에서 개발한 가스구동 VM열펌프의 개략도이며, 실험결과 난방시 2보다 큰 성적계수를 얻을 수 있었다.

4.2 University of Dortmund(독일)

Dortmund 대학의 Schulz 교수팀은 1970년대 말부터 VM사이클 열펌프의 개발을 위해 이론적, 실험적 연구를 꾸준히 해오고 있다. 주로 난방용 3.5kW-7.0kW급으로 약 7Hz의 저속으로 운전하는 VM열펌프를 제작, 실험하였다. 이 VM열펌프의 특징은 한 Displacer의 직경을 다른 Displ-

cer의 직경보다 크게함으로써 VM사이클 열펌프내에서 소형 스테어링 엔진사이클을 갖게 하여 이로부터 일부 일을 얻을 수 있도록 구조화 한 것이다. 전통적인 VM사이클 열펌프에는 열압축(Thermal Compression)만을 이용하는 것에 비해 여기서는 VM열펌프의 구동을 위하여 열압축에 기계적인 압축(Mechanical Compression)을 부가하여 Displacer를 구동시킬 수 있는 힘을 얻을 수 있어 시스템의 자립운전이 가능하다. 그러나 VM열펌프내의 스테어링사이클엔진의 출력은 시스템이 운전중에만 얻을수 있으므로 시동을 위한 전기구동모터가 여전히 필요로 한다. 이후 덴마크 및 일본에서의 VM사이클 열펌프의 개발에는 이러한 기계적압축의 개념이 도입되어 설계, 제작되었다.

4.4 The Technical University of Denmark (덴마크)

덴마크공대의 Carlsen 교수팀은 덴마크정부의 지원을 받아 AC Energi와 공동으로 1979년경부터 VM사이클 열펌프의 연구개발에 착수하였다. 처음 가정용 난방용 7.5kW급의 VM열펌프를 개발하였는데, 주요제원이 표 1에 표시되었다. 그리고 선박어선의 엔진 배열을 이용한 대형어선의 냉동고용 VM사이클 열펌프의 개발을 1985년부터 시작하여 1989년도에 그 실험 결과를 발표하였다. 20kW 급 VM사이클 열펌프의 구조

표 1 7.5kW급 가정 난방용 VM열펌프의 주요 재원 및 특성(덴마크공대)

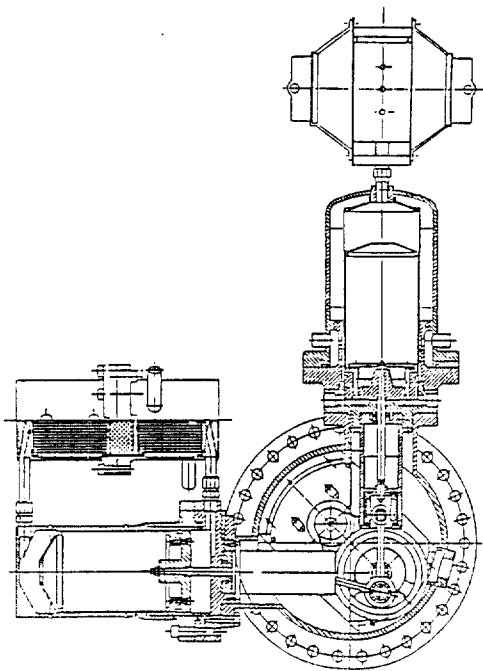


그림 4 뮌헨공대의 가스구동 VM열펌프의 개략도

Bore	60 mm
Stroke	38 mm
Mean pressure	20 MPa
Working gas	Helium
COP _n	1.64(Capacity : 7.5kW)
Dimensions	600 W X 600 D X 1600H (mm)
Weight	80 kg
Engine speed	1200 rpm
Phase angle	90°

가 그림 5에 나타나 있고, 주요제원과 특성이 표 2에 나타나있다. 엔진의 배열을 이용하여 냉방을 할때 4kW의 냉방능력으로 냉방 COP 0.35를 얻었고, 천연가스 연소에 의한 난방 운전시에는 20kW의 난방능력과 난방 COP 1.6을 얻었다.

표 2 20kW급 VM열펌프의 주요 제원 및 특성 (덴마크공대)

Bore	105 mm
Stroke	51 mm
Mean pressure	12 MPa
Working gas	Helium
COP _h	1.64(Capacity : 18kW)
COP _c	0.35(Capacity : 4kW)
Dimensions	800 W X 500 D X 1200H (mm)
Weight	175 kg
Engine speed	1200 rpm
Phase angle	90°

4.5 Sanyo전기(일본)

일본 Sanyo전기는 동경가스, 오사카가스, 도호가스회사와 공동으로 냉방능력 11kW, 난방능력 20kW급을 Package화 한 VM사이클 열펌프 시작기를 1990년에 개발하였고, 현재 이의 상품화를 위한 Field Test중이다. 산요전기에서 목

표 3 Sanyo전기의 VM열펌프 시작기의 목표 사양

COP _c	0.8(Capacity : 10.5kW)
COP _h	1.5(Capacity : 19.8kW)
Dimensions	900 W X 380 D X 1400H (mm)
Weight	150 kg
Noise level	55 dB(A)
Engine speed	500 to 1200 rpm
Working gas	Helium
Mean pressure	12 MPa
Phase angle	90°

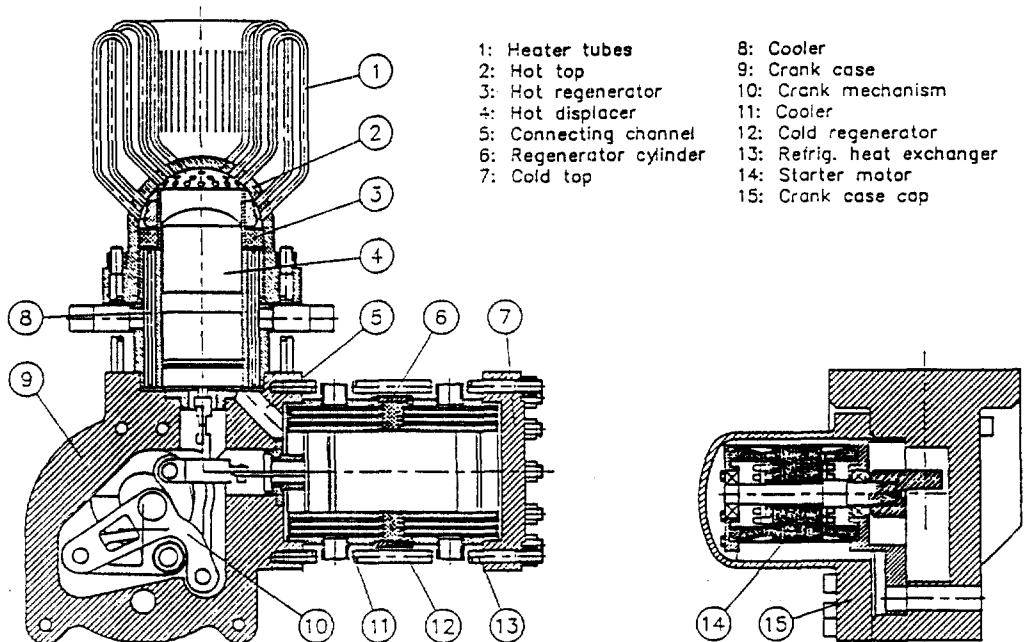


그림 5 20kW 급 VM열펌프의 구조

표로한 VM열펌프의 사양이 표 3에 나타나 있으며, 주로 상용화를 위한 Control에 많은 주안점을 두었다. 시작기의 실험결과 VM사이클 열펌프가 부하변동에 따른 응답성이 좋아 난방 및 냉방시즌 모두가 걸쳐 가변용량으로 운전되기 때문에, ON-OFF로 운전되는 정격용량 열펌프보다 훨씬 효율적임을 실증하였다.

4.6 Mitsubishi전기(일본)

Mitsubishi전기는 냉방능력 2kW급의 VM사이클 열펌프의 시작기를 1990년도에 개발하였는데 이의 구조는 그림 6에 나타나 있다. 지금까지 개발된 VM사이클 열펌프가 L자형인데 비해 이 시작기에는 고온측과 저온측의 실링 연결부분의

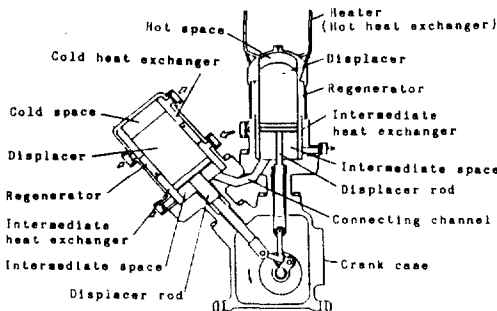


그림 6 Mitsubishi전기의 VM열펌프 시작기의 구조

표 4 Mitsubishi 전기의 VM열펌프 시작기의 제원 및 특성

Bore(Hot)	80 mm
Stroke(Hot)	51 mm
Bore(Cold)	97 mm
Stroke(Cold)	60 mm
COP _c	0.58(Capacity : 1.5kW)
COP _h	1.54(Capacity : 4.4kW)
Dimensions	530 W X 4000 D X 790H (mm)
Weight	60 kg
Engine speed	350 rpm
Working gas	Helium
Mean pressure	6 MPa
Phase angle	80°

사체적을 줄이기 위해 두개의 실린더가 V자형으로 배치되어 있는 것이 특징이다. 시작기의 주요 제원이 표 4에 나타나 있다. 실험결과 220 rpm으로 자립운전이 가능했으며, 보조구동모터를 사용하여 350rpm의 축 회전수에서는 냉방출력 1540W, 난방출력 4430W가 얻어져서 냉방 COP 0.58, 난방 COP 1.54로 나타났다.

4.7 미국 Sunpower사의 Duplex Stirling Heat Pump(DSHP)

VM사이클 열펌프와 유사한 것으로서 미국의 Sunpower사가 1960년대말부터 축적해온 Free-Piston 스테링 엔진기술을 발전시켜 1979년 이후 Duplex Stirling Heat Pump(DSHP)의 개발을 위한 연구를 계속 해오고 있다. DSHP는 스테링 엔진구동 스테링 냉동기의 일종으로, Free-Piston 스테링 엔진의 출력으로 직접 냉동스텝링 사이클을 구동시켜 냉열 및 난방열을 발생시키는 열펌프이다. 그림 7에 DSHP의 구조가 나타나 있다. 이 그림에서와 같이 상부가 엔진부, 하부가 열펌프부로서 구성되어 있으며, 스테링 엔진의

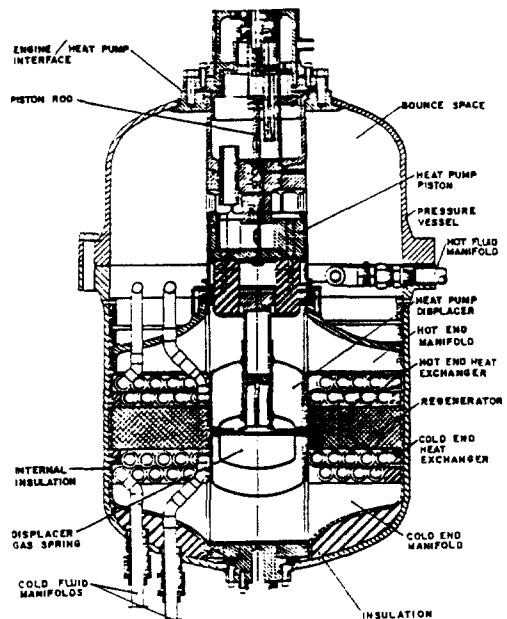


그림 7 Duplex Stirling Heat Pump의 구조

동력 피스톤이 열펌프와 압축피스톤과 연결되어 있어 엔진의 출력이 직접 열펌프에 전달된다.

DSHP는 VM열펌프와 같은 특징을 가지고 있으면서 VM열펌프보다 소형으로 고효율 고효율이 기대된다. 그러나 Free-Piston형 기기이기 때문에 각각의 진동하는 피스톤계의 조절이 상당히 어려운 단점이 있다.

5. 결 언

극저온 영역에서 응용되던 VM사이클이 최근 공조영역으로 응용하기 위한 연구개발이 선진 각국에서 활발히 진행되고 있지만 이에 대한 원리 및 개발현황에 대한 소개가 미흡한 실정이다. 현재까지의 시작기로만 판단하면 높은 난방 COP(1.5이상)가 실증되고 있으나 냉방 COP와 비출력의 측면에서는 여전히 개선의 여지가 많다.

VM사이클 열펌프는 지구환경문제 및 하절기 전력수급의 불균형 문제의 해결 등 많은 장점이 있음에도 불구하고 지금까지 실용화되지 못한 이유는 아직 넘어야 할 기술적인 면도 있고 현 기술로서 제작단가가 높다는 문제점도 있다. 이의 실용화를 위해서는 기술적으로는 밀봉장치, 내열재료의 개발, 공기예열기와 연소시스템의 열효율, 속도제어, 시스템의 효율적 제어 등이 어려운 과제로 남아 있다. 그러나 현재 선진각국에서 경쟁적으로 이루어지고 있는 VM사이클 열펌프의 연구로 이러한 개발상의 어려운 문제점들을 해결해 나가면서 경제성을 추구하는 연구가 활발하게 진행되고 있어 머지않아 상품화될 전망이다. 우리나라에서도 VM사이클 열펌프의 연구개발에 노력을 기울여 차세대 냉난방 시스템의 혁신에 동참하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Vuilleumier, R., "Method and Apparatus for Inducing Heat Exchange", U.S. Patent 1275 507, 1918.
2. Wurm, J., Kinast, J.A., Roose, T.R., and Staats, W.R., *Stirling and Vuilleumier Heat Pumps, Design and Applications*, McGraw-Hill, NY, 1990.
3. Eder, F.X. and Blumenberg, J., "Wirkungsweise, Aufbau und Betriebseigenschaften einer Vuilleumier-Wärmepumpe", *Ki Klima-Kalte-Heizung*, Vol. 12, pp.537-542, 1987.
4. Suganami, T., Kawajiri, K., and Honda, T., "Vuilleumier Cycle Heat Pump", Proc. 3rd International Energy Agency Heat Pump Conference, Tokyo, Japan, Mar. 12-15, pp.585-594, 1990.
5. Kuhl, H.-D. and Schulz, S., "Measured Performance of an Experimental Vuilleumier Heat Pump in Comparison to 3rd Order Theory", *IECEC*, 1989.
6. Carlsen, H., "Development of a Gas fired Vuilleumier Heat Pump for Residential Heating", Proc. *IECEC-89*, 899175, 1989.
7. Carlsen, H., "Development of a New 20 kW Gas Fired Heat Pump Based on the Vuilleumier Cycle", Proc. *IECEC*, Vol.2, pp.233-238, 1990.
8. Nakazato, I., Katohno, R., Nakazato, T., Fujimaki, S., Fujino, S., and Hoshida, T., "The Development of a Vuilleumier Cycle Heat Pump System", Proc. 26th *IECEC* Vol. 2, pp. 516-521, 1991.
9. Terada, F., Nakazato, T., Matsue, J., Abe, K., Narumiya, A., Ogawa, M., "Direct Drive Heat Pumps", *ASHRAE Journal*, Vol.33, No.8, pp. 22-25, 1991.