

재생형 극저온 냉동기

Regenerative Cryocoolers

김 수 연

S. Y. Kim

영남대학교 기계공학과



· 1956년생
· 열유체 시스템 및 극저온 냉동기 개발에 관심을 가지고 있다.

1. 서 론

극저온(cryogenic)은 대체로 120K 이하의 온도영역을 말하며, 120K 이하의 온도를 생성하는 냉동시스템을 극저온 냉동기(Cryocooler)라 부르고, 사용하는 온도영역에 따라 다양한 극저온 냉동기가 개발되어 왔다. 극저온 기술은 미국, 일본, 스웨덴 등 일부 선진국을 중심으로 꾸준히 발전하여 왔으며, 이에 대한 수요가 미사일 및 인공위성에 사용되는 적외선 감지기(infrared detector)의 냉각을 비롯하여 군사, 우주항공, 진공, 의료분야 등에서 꾸준히 증가하고 있다. 우리나라도 기초과학 분야를 비롯하여 반도체 산업분야 등의 많은 산업분야에서 극저온 기술에 대한 수요가 역시 점차 증가하고 있고, 특히 21세기 이후 소형 극저온 냉동기에 대한 수요가 급증할 것으로 보여진다. 소형 극저온 냉동기의 주류를 이루는 것은 재생형 냉동기인데, 여기서는 재생형 극저온 냉동기를 중심으로 저온생성원리, 냉동기의 구조와 작동원리, 연구개발정도 등을 살펴보고자 한다.

1.1 저온 생성원리

극저온을 생성하는 방법에는 J-T(Joule-Thomson)효과, 단열팽창효과, 자기냉동효과(Magnetic cooling effect), 열전(Thermoelectric)효과를 이용하는 방법이 있다.

J-T효과는 등엔탈피 과정인 교축과정(throttling process)에서 압력강하와 함께 온도강하가 생기는 효과를 말하며, 대표적인 등엔탈피 과정은 고압의 기체가 orifice나 porous plug를 통과하면서 팽창하는 것이다. 등엔탈피 과정에서 압력강하($\Delta P < 0$)에 따른 온도의 변화를 JT계수(μ_{JT})로 표시하며,

$$\mu_{JT} = (\partial T / \partial P)_h \quad (1)$$

$\mu_{JT} > 0$ 인 경우에만 온도강하 효과가 있고, 반면에 $\mu_{JT} < 0$ 인 경우는 오히려 온도상승 효과가 나타나게 된다. 그리고 $\mu_{JT} = 0$ 인 경우는 온도강하 효과가 없는데 이때의 온도를 역전온도(inversion temperature)라 하고, T-P 선도에서 역전온도의 궤적을 역전곡선(inversion curve)이라 한다. 등엔탈피 과정에 온도강하 효과를 얻기 위해서는 J-T 계수가 $\mu_{JT} > 0$ 이 되는 저온까지 기체를 예냉(precooling)시켜야 하고, 예냉되는 기체의 온도는 적어도 그 기체의 최대역전온도(maximum inversion temperature)이하가

표 1 최대 역전온도

Gases	Normal Boiling Temp. (K)	Critical Point		Max. Inversion Temp. (K)
		Temp. (K)	Pressure(atm)	
He-4	4.214	5.2	2.26	45
H ₂	20.27	33.2	12.98	205
Ne	27.09	44.44	26.2	250
N ₂	77.36	126.1	33.5	621
Air	78.8	133	38.7	603
Ar	87.28	150.7	48.3	722
O ₂	90.18	154.6	50.1	761
CH ₄	117.7	190.7	45.8	939

되어야 하며, 표 1에서 보듯이 헬륨가스의 경우 최대역전온도는 45K이다.

등엔트로피 과정으로 진행되는 단열팽창 과정은 열역학적 원리상 가장 이상적인 저온생성 방법이며, 고압의 압축성 기체를 터빈이나 팽창기를 통하여 외부에 일을 추출 하면서 단열팽창시킬 때 기체의 온도는 급격하게 낮아지게 된다. 실제의 팽창과정은 완전한 등엔트로피 과정이 되지 못하고 어느정도 비가역적으로 진행된다. 단열팽창에 의한 온도강하는 J-T효과에 의한 온도강하보다 크며, 단열팽창이 일어나는 경우는 $\mu_s > 0$ 으로 항상 온도강하를 얻을 수 있다.

$$\mu_s = (\partial T / \partial P)_s > 0 \quad (2)$$

열역학적으로 볼 때 등엔트로피 과정은 가역과정이나, 등엔탈피 과정은 비가역 과정으로 비가역성에 의한 손실이 많다. 그러나 J-T효과에 의한 온도강하는 모세관이나 팽창밸브와 같은 비교적 간단한 장치를 이용하여 얻을 수 있으나, 단열팽창에 의한 경우는 외부로 일을 추출하기 위해 저온에서 작동하는 팽창기 또는 터빈이 필요하다.

자기냉동효과는 1K이하의 온도를 얻기 위하여 사용되고, 열역학적 원리는 등엔트로피 팽창과 비슷하며, 상자성체인 상자성염(paramagnetic salt)에 단열소자(adiabatic demagnetization)방법을 적용하여 저온을 얻는 방법이다. 상자성염에 외부에서 자장(magnetic field)을 걸어주면 무질서하

게 있던 상자성염의 원자들이 정렬하고 자화(magnetization)하여 상자성염은 자석이 되고 이에 따라 온도가 올라 가게 되는데, 이 과정은 외부에서 일을 투입한 압축과정과 유사하다. 이때 액체헬륨 혹은 액체헬륨 냉각시스템으로 열을 제거하여 주면 1K의 온도로 유지될 수 있다. 그 다음 과정으로 외부자장을 단열적으로 제거하면 자화되어 있던 상자성염이 소자(demagnetization)되고 온도가 강하하게 되며, 이 과정은 외부로 일을 추출하는 단열팽창 과정과 유사하다. 이와 같은 일련의 과정으로 1K 이하의 극저온을 얻을 수 있다.

열과 전기가 동시에 흐르는 현상을 열전현상(thermoelectric phenomina)이라 하며, 온도차에 의하여 전위차가 발생하는 것을 Seebeck효과라 하고, 도체에 전류가 흐르면서 열이 따라 이동하는 현상을 Peltier효과라 한다. 열전효과에 의한 온도강하는 역Seebeck효과에 의하여 전위차에 의한 온도차를 발생시켜 저온을 얻고, 저온공간에서 흡수한 열은 Peltier효과를 이용하여 외부로 방출된다. 이러한 열전효과를 이용한 냉동기가 열전열펌프(thermoelectric heat pump)이다.

1.2 극저온 냉동기의 종류

극저온 냉동기는 사용온도, 냉동용량, 작동원리, 열교환기의 형태, 밸브의 유무등 다양한 관점에서 분류되고 있다. 열교환기의 형태

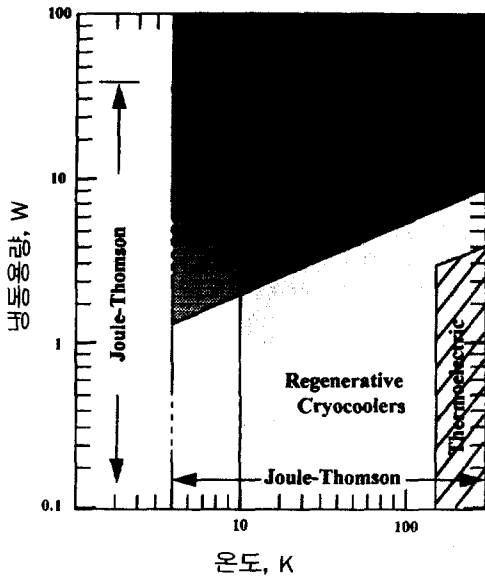


그림 1 여러 극저온 냉동기의 대표적인 운전영역

표 2 재생형 극저온 냉동기의 장단점

	Recuperative	Regenerative
Reliability	neutral	neutral
Efficiency	disadvantage	advantage
Vibration	advantage	disadvantage
Transport refrigerant	advantage	disadvantage
Simple heat exchanger	disadvantage	advantage

에 따라 극저온 냉동기는 열교환형(recuperative type)과 재생형(regenerative type)으로 나누어진다. 그림 1에서 보듯이 대체로 재생형은 소용량 냉동기이고, 10K 이상의 온도 영역에서 작동하며, 반면에 열교환형은 주로 대용량 냉동기이거나 10K 이하의 온도에서 사용되는 소용량 냉동기이다.

일반 열교환기는 재생기에 비하여 보다 더 크고 복잡하며, 열교환형 냉동기에서 불용체적(void volume)이 시스템의 성능에 미치는 영향이 적다. 재생형 냉동기에는 몇 개의 운동하는 부품이 있지만, 신뢰성에 있어서는 재생형과 열교환형이 거의 같다. 재

생형과 열교환형의 장단점은 그림 2에서 보는 바와 같다.

재생형 극저온 냉동기에는 밸브유무와 구동 방식에 따라 Stirling냉동기, VM(Vuilleumier) 냉동기, Solvay냉동기, GM(Gifford-McMahon)냉동기, 맥동관(Pulse tube)냉동기, GM/JT 혼합형 냉동기, GM/Pulse tube 혼합형 냉동기 등이 있으며, 20K-80K의 온도 영역에서 가장 실용화된 것은 Gifford-McMahon 극저온 냉동기이다. 열교환기형에는 Linde-Hampson냉동기, Claude 냉동기, Collins 냉동기, Brayton 냉동기 등이 있다.

1.3 재생기

냉동기 시스템은 여러 구성품들로 구성되어 있으며, 냉매가스가 순환하여 사이클과정을 이루면서 저온부(냉동공간)로부터 열을 흡수하고 이 열량과 함께 투입한 일을 고온부로 방출하게 되어 있다. 이러한 냉동 시스템의 특성 및 성능은 각각의 구성품의 특성 및 성능에 의존하게 된다. 재생형 열교환기(regenerative heat exchanger), 즉 재생기(regenerator)는 압축기와 함께 재생형 냉동기의 성능에 결정적 영향을 미치는 핵심구성품이며, 일반 열교환기(recuperative heat exchanger)에서는 저온유체 및 고온유체가 서로 다른 통로를 흐르면서 열을 교환하는데 비해 재생기는 그림 2에서 보는 바와 같이 동일한 통로를 고온가스 및 저온가스가 주기적으로 왕복유동하면서 축열 및 방열을 하여 열을 교환한다.

이와 같이 재생기에서의 유동은 주기적 왕복유동이며, 주기적 왕복유동에 의하여 축열 및 방열 역시 주기적으로 이루어지고, 유용도(effectiveness)와 압력강하는 재생기의 형상 및 크기와 함께 충전재료에 크게 의존하게 된다. 재생기의 설계 및 제작을 위해서는 유용도와 압력강하에 대한 많은 자료가 요구되고 있으나, 공개된 자료는 상당히 미비하다(재생형 냉동기를 제작하는 회

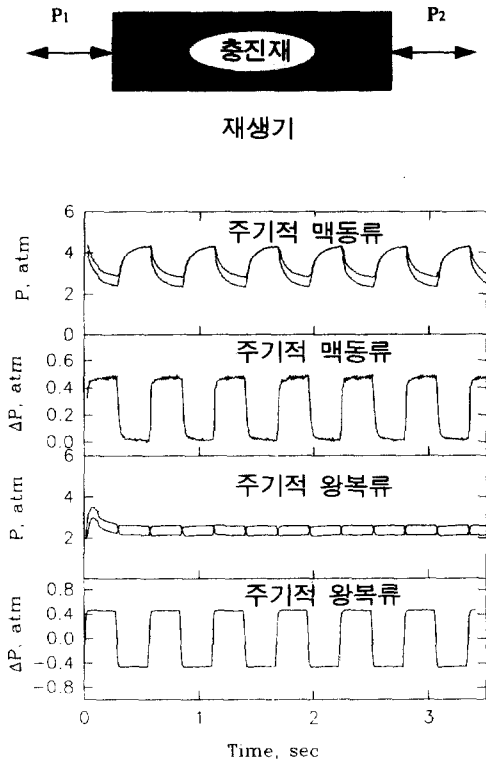


그림 2 재생기에서 압력과 압력강하의 거동

사에는 많이 있을 것으로 생각되지만). 재생기는 일반 열교환기에 비하여 다음과 같은 장점이 있다.

1) 금속망이나 Wire 또는 작은 구슬 등을 충전재로 사용하므로 단위 부피당 전열 면적이 대단히 넓다.

2) 구조가 간단하여 제작 및 조립이 용이하고 경제적이다.

3) 동일한 통로를 유체가 주기적으로 왕복하므로 자정(self-cleaning) 효과가 있다. 반면에 단점은 다음과 같다.

1) 대체로 20K 이하의 온도에서 충전재료의 비열은 크게 감소하고, 이에 따라 재생효과가 급격히 감소하며,

2) 유체의 압력강하가 크다.

재생기의 구조는 크게 표 3에서 보듯이 packd bed type과 annulus type이 있다.

표 3 재생기의 형태

Type	Detail
Packed bed type	Sphere bed type
	tube type
	wool type
	cylindrical bar type
	stacked screen type
	disk type
Annulus type	straw type
	foil type
	plate type

충진재에는 금속matrix와 비금속matrix 등이 있는데, 충전재가 갖추어야 할 조건으로서 단위체적당 표면적이 클 것, 열용량이 클 것, 유동방향으로의 열전도계수가 적을 것, 제작 및 조립이 용이할 것 등이 요구된다.

2. 재생형 극저온 냉동기의 구성과 작동 원리

2.1 Stirling 냉동기

Stirling 냉동기는 Stirling 열기관을 역으로 작동시키는 것으로서 헬륨가스로 작동되고 가장 기본적인 극저온 냉동기 중의 하나이며, 열역학적 효율이 높고, 제작이 비교적 용이하며 소용량에서 대용량에 걸쳐 널리 사용되고 있다. 작동원리는 그림 3에서 보듯이 두개의 등온과정과 두개의 등적과정으로 구성되는 사이클로서 설명되며, 기본적으로 외부에서 일을 투입하여 온도가 높은 상태에서 등온압축하고, 온도가 낮은 상태에서 외부에 일을 하면서 등온팽창하여 냉매가스가 저온부로 부터 열을 흡수하도록 되어 있다. 사이클 과정은 다음과 같다.

1) 1-2 과정 : 고온가스가 등온압축을 하면서 외부로 열을 방출한다. 이 과정동안 외부로 열을 방출하여 압축에 따른 냉매가스의 온도상승은 없다.

2) 2-3 과정 : 가스가 재생기를 지나면서 냉각되어 팽창기쪽으로 등적이동하며, 이

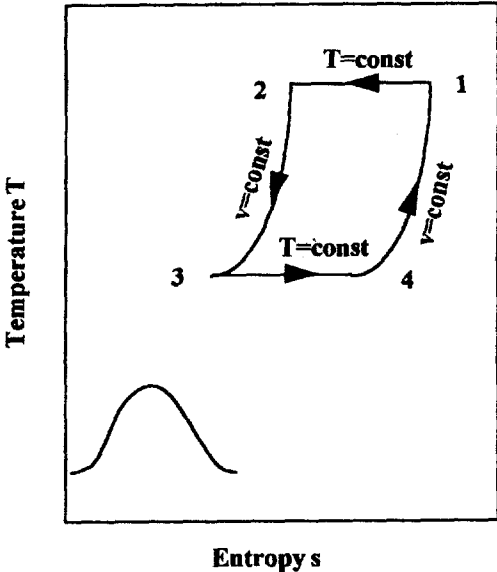
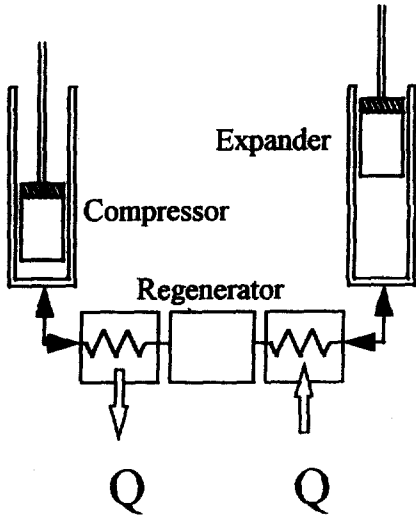


그림 3 Stirling 냉동기

과정동안 가스는 냉각되면서 재생기에 축열을 하게 된다.

3) 3-4 과정 : 저온가스는 등온팽창하면서 저온부로부터 열을 흡수한다. 이 과정동안 저온부로부터 열을 흡수하여 팽창에 따른 가스의 온도강하는 없다.

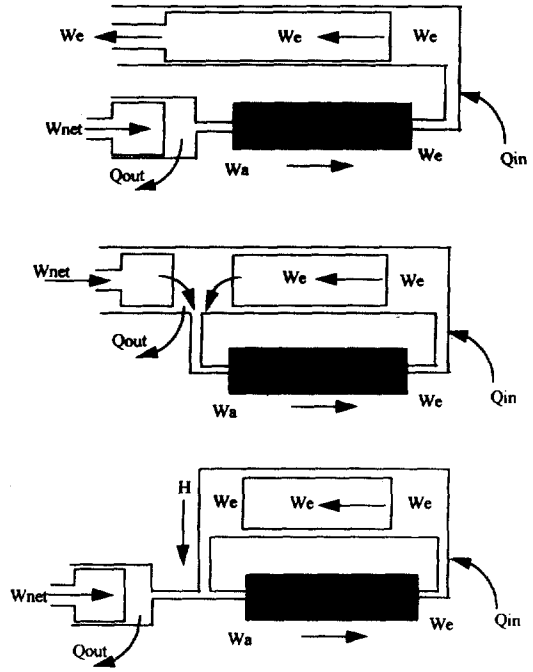


그림 4 Stirling 사이클 냉동기

4) 4-1 과정 : 팽창기에 있는 저온가스가 재생기를 통과하면서 가열되어 압축기쪽으로 등적이동한다. 이 과정에서 재생기에 저장된 열이 가스쪽으로 방열되는데 방열되는 양은 2-3과정에서 축열되는 양과 같다.

5) 1)의 과정으로 되돌아 간다.

사이클이 반복됨에 따라 새로운 사이클은 전번 사이클에 비하여 냉각부의 온도가 더 낮아지고, 냉동기의 최저온도는 냉동부하와 냉동용량이 균형을 이루는 상태에서 온도가 된다. 이와 같은 원리로 작동하는 Stirling냉동기에는 다양한 종류가 있으나, 그림 4에서 보듯이 시스템의 구성형식에 따라 two-piston Stirling냉동기, integral Stirling냉동기, split Stirling냉동기, double-acting Stirling냉동기, 다단식 Stirling냉동기가 있다. 1980년대 초기에 Oxford대학에서 개발한 분리형은 성능과 수명을 크게 향상시켰다.

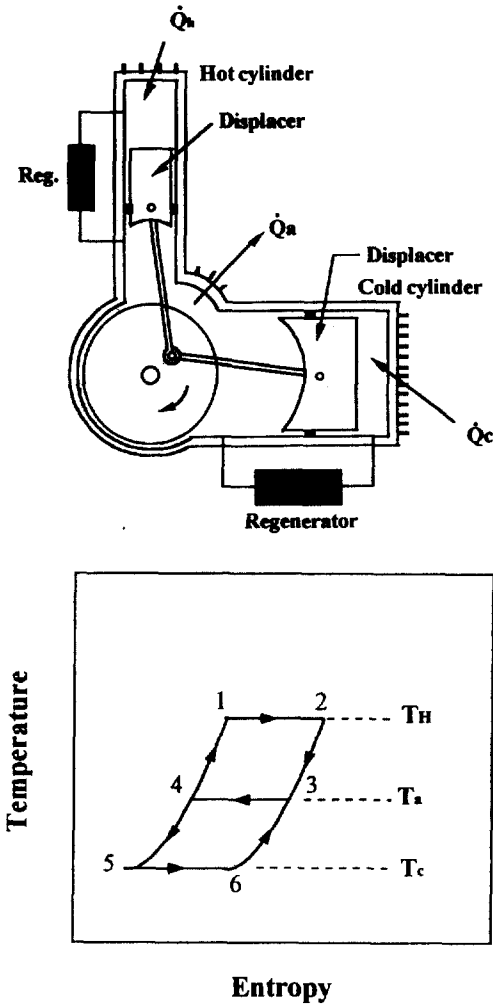


그림 5 VM 냉동기

VM냉동기는 그림 5에서 보듯이 Stirling 냉동기와 Stirling기관이 하나의 장치로 결합된 것으로 볼 수 있고, 외부 열원에 의하여 구동되는 냉동기이다. 즉 외부의 열원을 이용하여 Stirling기관을 구동하고, 이 기관의 출력을 냉동기의 압축기 구동동력으로 사용하는 것이 VM냉동기이다.

2.2 Solvay 냉동기

Stirling냉동기는 압축기와 팽창기가 하나의 조합으로 구성되어 있고, 이로 인하여 구

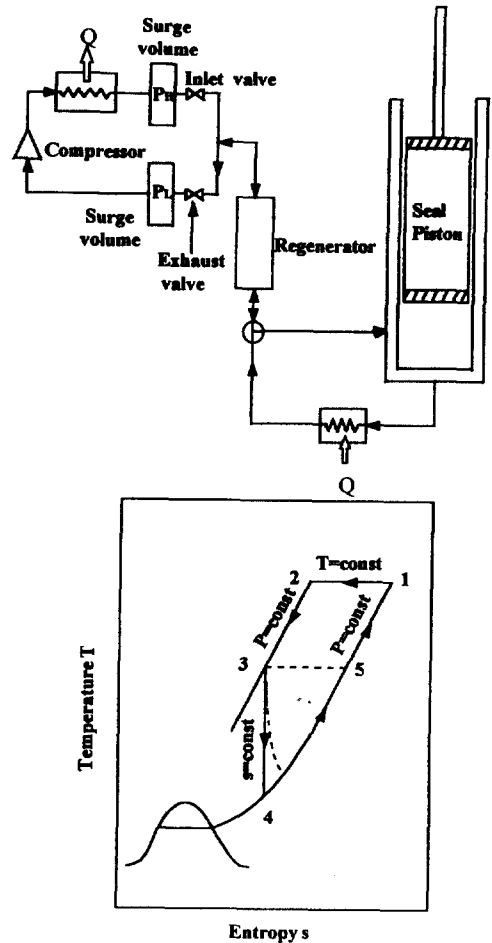


그림 6 Solvay 냉동기

동장치 및 용량의 선택에 제한이 많다. 이러한 Stirling냉동기에 밸브를 사용하여 압축기를 팽창기와 분리한 것이 Solvay냉동기이고, 압축기의 다양한 선택이 가능하게 되었다.

그림 6에서 보듯이 Solvay냉동기는 압축기, 재생기, 팽창기 그리고 흡입밸브(고압밸브) 및 배기밸브(저압밸브)로 구성되어 있으며, 압축기에서 압축된 고압의 냉매가스가 예냉된 후 팽창기와 연동하여 작동하는 밸브를 이용하여 팽창기에 흡입 및 배출시키는 원리로 되어 있다. 사이클 과정은 다음

과 같다.

1) 1-2 과정 : 피스톤이 상사점에 있을 때 배기밸브를 닫고 흡입밸브를 연다. 고압의 가스가 재생기로 흘러 들어가고 시스템의 압력은 저압(P_L)에서 고압(P_H)으로 증가한다.

2) 2-3 과정 : 흡입밸브가 열려 있는 상태에서 피스톤이 하사점 쪽으로 어느정도 이동하고, 고압가스는 재생기를 지나 실린더 내로 흡입된다. 가스는 재생기를 지나면서 재생기에 저장되어 있던 냉열에 의하여 온도가 낮아지게 된다.

3) 3-4 과정 : 흡입밸브가 닫히고, 실린더 내의 고압가스는 팽창하며 피스톤은 하사점에 도달한다. 이때 가스는 팽창하면서 피스톤에 일을 한다. 가스로 부터 제거된 에너지는 일의 형태로 외부로 추출되고, 이에 따라 가스의 온도는 낮아지게 된다.

4) 4-1 과정 : 배기밸브가 열리고, 피스톤이 하사점에서 상사점으로 이동하여 저온가스는 실린더 외부로 배출되며, 배출되는 저온가스는 저온부로부터 열을 흡수한다. 그리고 이 가스가 개생기를 통과하면서 가열되고, 압축기 입구 쪽으로 흘러간다. 이 때 재생기의 온도는 낮아지고 재생기에 냉열이 저장된다.

5) 1)의 과정으로 되돌아간다. 사이클이 반복됨에 따라 새로운 사이클은 전번 사이클에 비하여 냉각부의 온도가 더 낮아지고, 냉동기의 최저온도는 냉동부하와 냉동용량이 균형을 이루는 상태에서의 온도가 된다. 이와 같이 작동하는 Solvay냉동기는 1950년대 후반에야 비로소 극저온 냉동기로 Gifford와 McMahon에 의하여 실용화되고 소형 infrared cooler에 사용되었다.

2.3 Gifford-McMahon 냉동기

GM냉동기는 20K-80K의 온도범위에서 가장 널리 사용되는 소형 극저온 냉동기이다. Solvay냉동기는 그 작동이 열역학적 원리상 매우 훌륭하지만 상용화에 성공하지

못하였는데, 그것은 팽창과정에서 피스톤에 높은 가스압력이 작용한 상태하에 팽창이 이루어지고 동시에 팽창일을 외부로 소산시켜야 하므로 피스톤의 기밀과 윤활이 어렵다는데 기인한다. 극저온 영역에서 이러한 작동을 하는 팽창기는 제작하기 어려울 뿐만 아니라 수명도 매우 짧게 된다. 이러한 Solvay냉동기의 문제점을 완화한 것이 GM 냉동기인데 그것은 그림 7에서 보듯이 Solvay냉동기와 유사하게 압축기, 재생기, 왕복기가 들어 있는 실린더 그리고 흡입(고압)밸브 및 배기(저압)밸브로 구성되어 있으나 재생기 윗부분과 실린더 아랫부분을 관으로 연결하므로써 왕복기의 상단과 하단 사이에 압력차를 감소시켜 기밀과 윤활문제를 크게 완화하였다. 그 결과 GM냉동기는 신뢰성과 수명이 획기적으로 향상되었고,

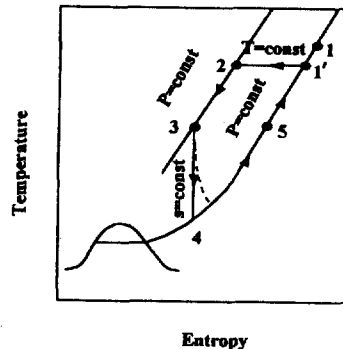
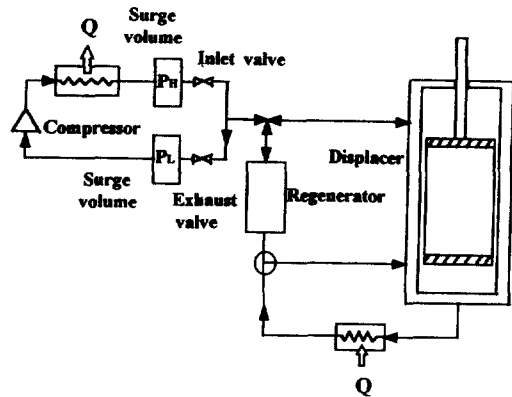


그림 7 GM 냉동기

저진동, 저소음, 소형경량화가 크게 진전되었다. 반면에 GM냉동기는 팽창과정에서 왕복기의 이동이 없이 즉, 외부로의 기계적 일의 추출없이 냉매가스가 팽창하는데, 이러한 비가역 팽창으로 인하여 Solvay냉동기에 비하여 열역학적 효율이 낮고 냉동용량도 줄어든다. 그러나 극저온 냉동기에 있어서 신뢰성과 수명이 무엇보다 우선하기 때문에 GM냉동기는 열역학적 효율 및 냉동용량 감소 요인에도 불구하고 상용화에 크게 성공하였다.

GM냉동기의 이상적인 사이클 과정은 다음과 같다.

1) 1-2 과정 : 왕복기가 상사점에 있을 때 배기밸브를 닫고 흡입밸브를 연다. 고압의 가스가 재생기, 왕복기 상부의 실린더를 채운다.

2) 2-3 과정 : 흡입밸브가 열려 있던 상태에서 왕복기가 하사점으로 이동하며, 실린더 상부에 있던 고압가스는 재생기를 지나 하부 실린더 내로 흡입되고 동시에 흡입밸브를 통하여 고압가스도 계속 유입된다. 이때 가스는 재생기를 지나면서 저장되어 있던 냉열에 의하여 온도가 낮아지게 된다.

3) 3-4 과정 : 왕복기가 하사점에 있는 상태에서 흡입밸브를 닫고 배기밸브를 연다. 실린더내의 고압가스는 최저압(PL)에 도달할 때까지 팽창하면서 재생기를 지나 배출되며, 가스의 온도는 낮아지게 된다. 저온가스는 재생기를 지나면서 재생기에 냉열을 저장하게 된다.

4) 4-1 과정 : 배기밸브가 열려 있는 상태에서 왕복기가 상사점에서 하사점으로 이동하여 저온가스는 실린더 외부로 배출되며, 배출되는 저온가스는 저온부로 부터 열을 흡수한다. 그리고 저온가스는 재생기를 통과하면서 가열되고, 재생기의 온도는 낮아지며 재생기 냉열이 저장된다. 실린더에서 배출되는 가스의 대부분은 압축기 입구쪽으로 흘러가고 일부는 왕복기 상부 실린더에 흡입된다.

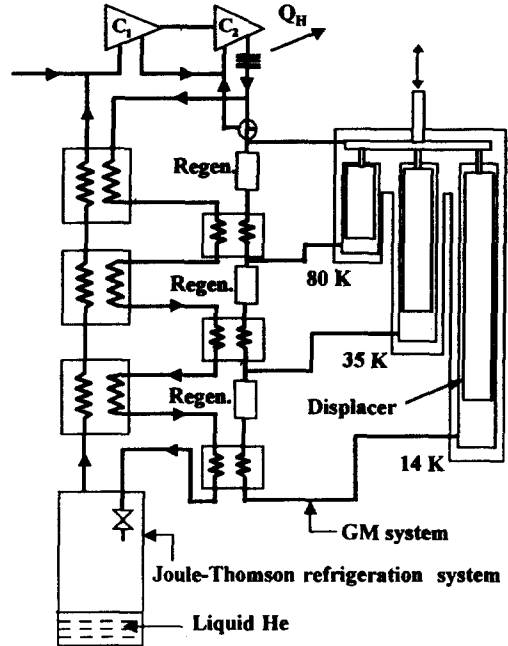


그림 8 헬륨액화용 J-T 냉동기에 부착된 3단 GM 냉동기

5) 1)의 과정으로 되돌아 간다.

사이클이 반복됨에 따라 새로운 사이클은 전번 사이클에 비하여 냉각부의 온도가 더 낮아지고, 냉동기의 최저온도는 냉동부하와 냉동용량이 균형을 이루는 상태에서 온도가 된다. 이와 같이 작동하는 GM냉동기는 10K 이하의 저온을 생성하기 위하여 다단식으로 구성하기가 매우 용이하며, 또한 그림 8에서 보듯이 헬륨액화기로 사용되는 Joule-Thomson냉동기에 결합되어 예냉기로 사용되기도 한다.

2.4 맥동관 냉동기

냉동효과를 생성하는 가장 간단한 장치 중의 하나가 맥동관(Pulse tube) 냉동기인데, 그것은 앞서 언급한 Solvay냉동기와 GM냉동기에서 문제가 되는 피스톤 혹은 왕복기를 제거하여 그 구조를 획기적으로 간단하게 한 것이다. 맥동관 냉동기는 그림 9에서 보는 바와 같이 압축기, 재생기, 관 그

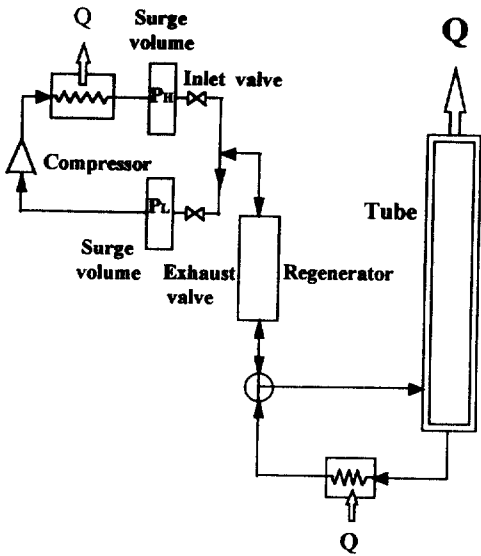


그림 9 맥동관 냉동기

리고 흡입(고압) 및 배기(저압)밸브로 구성 되어 있고, 단순히 밸브개폐를 제어함으로써 냉매가스를 관속으로 충전하거나 관에서 외부로 팽창배출하여 저온의 냉매가스가 생성되게 하는 원리로 되어 있다.

맥동관 냉동기에서 이루어지는 사이클 과정은 T-s 선도나 P-v선도로 나타내기에는 어려운 점이 많으며, 사이클 과정은 다음과 같은 과정으로 되어 있다.

1) 배기밸브를 닫고 흡입밸브를 연다. 고압(P_H)의 냉매가스가 재생기를 지나 관속으로 흡입되며, 가스는 재생기를 지나면서 냉각된다. 이 과정에서 가스가 충전됨에 따라 관속의 압력이 초기의 저압(P_L)에서 고압(P_H)으로 증가하며, 이에 따라 관 윗부분에 위치한 가스는 압축되어 그 온도가 상승하게 되고 관 윗부분은 고온부가 된다. 이 부분을 냉각하기 위하여 관 상부의 외벽은 편이 부착된 열교환기로 되어 있다.

2) 흡입밸브를 닫고, 배기밸브를 연다. 관 내의 고압가스는 최저압(P_L)에 도달할 때까지 팽창하면서 재생기를 지나 배출되며, 가스의 온도는 낮아지게 된다. 저온가스는 재생기를 지나면서 재생기에 냉열을 저장하

게 된다. 이 과정은 외부로 기계적 일의 추출없이 진행되는 비가역 팽창과정이고, 또한 최저압에 도달한 저온가스는 외부로 배출될 수 없기 때문에 저온부의 열을 흡수하거나 재생기에 냉열을 저장하는 경우에는 전혀 이용할 수 없다.

3) 1)의 과정으로 되돌아 간다.

사이클이 반복됨에 따라 새로운 사이클은 전번 사이클에 비하여 냉각부의 온도가 더 낮아지고, 냉동기의 최저온도는 냉동부와 냉동용량이 균형을 이루는 상태에서의 온도가 된다. 이러한 과정으로 작동하는 맥동관 냉동기는 그 출력과 효율이 다른 냉동기에 비하여 떨어지지만 구조가 간단하여 신뢰성과 수명이 특히 우수하고, 제작 또한 용이하고 가격도 저렴하기 때문에 앞으로 기존의 여러가지 극저온 냉동기들을 대체할 가능성이 매우 높다. 이에 따라 출력과 효율의 증가를 위하여 그림 10에서 보듯이 다양한 형태의 맥동관 냉동기가 연구개발되고 있다.

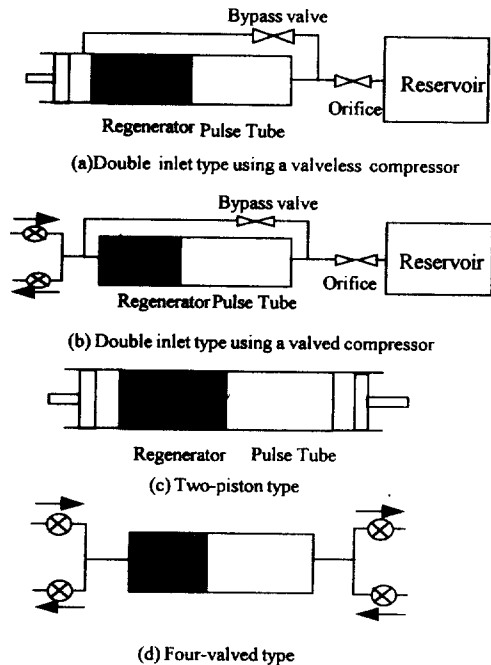


그림 10 여러가지의 맥동관 냉동기

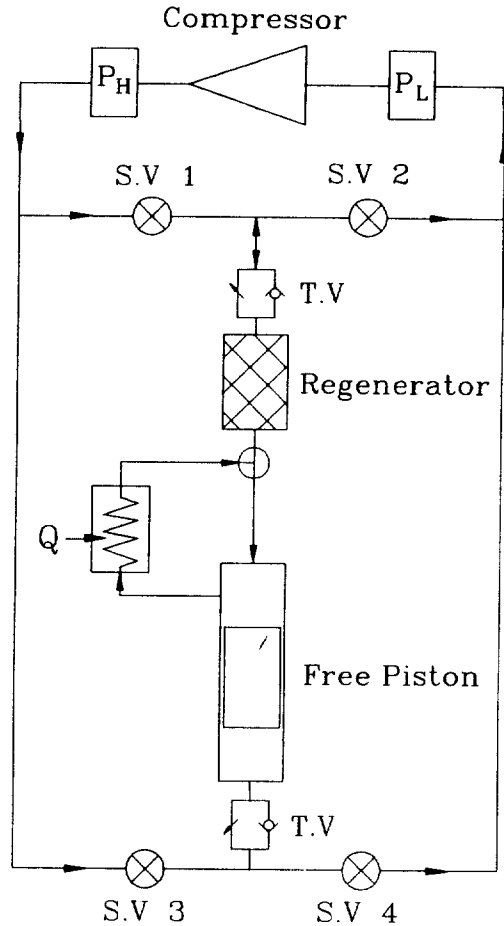
맥동관 냉동기에서 한걸음 더 나아가 구조를 단순화한 것이 열음향 맥동관 냉동기(Thermoacoustic pulse tube)인데, 그것은 맥동관 냉동기에서의 압축기를 음향 구동기(일종의 스피커임)로 대체한 것이다. 열음향 맥동관 냉동기는 음향 구동기에서 발생하는 높은 주파수의 진동류(periodic oscillating flow)에 의하여 저온을 생성하게 된다.

2.5 전자제어식 재생형 냉동기(Modified Solvay 냉동기)

Solvay냉동기와 GM냉동기에서는 왕복기(혹은 피스톤)와 밸브가 연동하여 동작하게 하는 기계적 구동장치가 필수적인데, 이 구동장치를 단순한 전자제어식 솔레노이드 밸브(Solenoid valve)로 대체하고, 동시에 왕복기를 자유피스톤(Free piston)으로 대체한 것이 전자제어식 재생형 냉동기이다. 이 전자제어식 재생형 냉동기는 저희 실험실에서 제안하고 개발 중에 있는 것이며, 그림 11에서 보듯이 압축기, 재생기, 자유피스톤이 들어 있는 실린더 그리고 네개의 솔레노이드 밸브로 구성되어 있으며, 구동부가 획기적으로 단순화되어 있다.

자유 피스톤은 그 양단에 작용하는 가스의 압력차에 의하여 움직이도록 되어 있고, 상사점과 하사점에서 통로를 밀폐시켜 양단에 고압과 저압을 지탱하게 된다. 또한 밸브와 재생기 사이 및 피스톤과 하부의 밸브 사이에 부착된 스톱클링 밸브는 일종의 속도 조절기로서 밸브의 작동에 따라 피스톤이 과속으로 가속되는 것을 막고, 가스팽창 및 흡입과정이 가역적으로 이루어지도록 하여 냉각성능을 높인다. 전자제어식 재생형 냉동기의 사이클과정은 다음과 같다.

1) 1번 밸브(고압밸브, 흡입밸브)와 4번 밸브(저압밸브, 배기밸브)를 연다. 이때 2번 밸브(저압밸브, 배기밸브)와 3번 밸브(고압밸브, 흡입밸브)는 닫혀 있다. 1번 밸브를 통해 들어온 고압가스는 재생기를 지나 피



S.V : Solenoid Valve

T.V : Throttle Valve

그림 11 전자제어식 재생형 냉동기

스톤 상부의 실린더 내부로 흡입된다. 그리고 피스톤이 하사점에 도달할 때까지 피스톤 하부의 가스는 고압을 유지한 상태에서 스톱클링 밸브와 4번 밸브를 지나 실린더 외부로 배출되게 된다. 이과정 동안 흡입되는 고압가스는 피스톤에 일을 하게 되고, 그 일은 배출되는 가스의 엔탈피형태로 외부로 방출되게 된다. 그 결과 흡입되는 고압가스는 재생기를 지나면서 냉각된 후 고압을 그

대로 유지한 상태로 실린더 내에 충전되므로, 실린더 내의 가스는 단열압축에 의한 온도상승이 없다.

2) 피스톤이 하사점에 도달하면 2번 밸브(저압밸브)를 열고, 1번 밸브는 닫는다. 실린더 내의 고압가스는 압력이 최저압력(P_L)이 될 때까지 재생기와 스토틀링 밸브를 지나 2번 밸브를 통해 배출되며, 이때 실린더 내의 가스의 압력강하는 단열팽창과정으로 진행되므로 가스의 온도는 계속 낮아지게 된다. 이 저온의 가스가 재생기를 지나면서 냉열을 저장 한다.

3) 3번 밸브(고압밸브)를 열고, 4번 밸브는 닫는다. 3번 밸브를 통하여 흡입되는 고압가스에 의하여 피스톤은 상사점으로 이동하게 되고, 피스톤 상부의 저온가스는 재생기를 지나면서 냉열을 저장하고 2번 밸브를 통해 배출된다. 피스톤이 상사점에 도달한 상태에서도 피스톤 하부의 압력이 최고압(P_H)이 될 때까지 고압가스가 계속 흡입된다.

4) 실린더 하부의 압력이 최고압에 도달하면 1번 밸브를 열고 2번 밸브를 닫는다. 이때 1번 밸브를 통하여 들어온 고압가스는 재생기까지의 빈 공간을 고압(P_H)으로 채워 피스톤의 양단에 고압이 걸리게 된다.

5) 1)의 과정으로 되돌아 간다. 사이클이 반복됨에 따라 새로운 사이클은 전번 사이클에 비하여 냉각부의 온도가 더 낮아지고, 냉동기의 최저온도는 냉동부하와 냉동용량이 균형을 이루는 상태에서의 온도가 된다. 앞에서 언급한 바와 같이 사이클 과정에 따른 각 밸브의 개폐순서는 Table 4와 같다.

표 4 밸브 개폐시기

	Valve1	Valve2	Valve3	Valve4
1	ON	OFF	OFF	ON
2	OFF	ON	OFF	ON
3	OFF	ON	ON	OFF
4	ON	OFF	ON	OFF

이와 같이 작동하는 전자제어식 재생기형

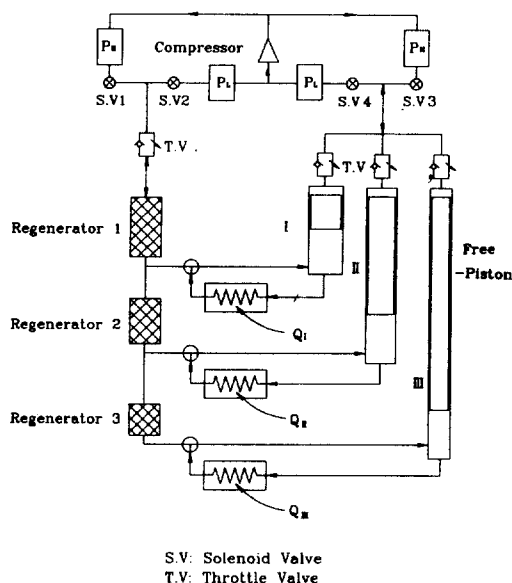


그림 12 3단 전자제어식 재생형 냉동기

냉동기는 구조가 간단하고, 운할 및 기밀문제가 해결되므로 신뢰성과 수명이 연장될 것으로 기대되며, 또한 제작이 용이하고 가격도 낮아질 것이다. 그리고 보다 낮은 저온을 생성하고자 하는 경우는 그림 12와 같이 다단식으로 구성할 수 있다.

3. 응용분야 및 연구개발

소형 극저온 냉동기는 주로 spot-cool cryogenic sensor, cold electronics, electro-optical system 등의 냉각용으로 주로 사용되고 있는데, 미사일 및 인공위성에 사용되는 적외선 감지기(infrared detector), Laser-beam-guide weapon, 극저온에서 작동하는 반도체 및 초전도체 전자제품 등의 냉각을 비롯하여 극저온 진공펌프, MRI 등의 냉각용으로도 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 이와 같이 냉각용 냉동기는 대체로 작동하는 온도영역이 20K-80K(80K가 가장 많이 사용됨)이고, 냉동용량은 수mW-1W정도이다. 앞으로 군사용 뿐만 아니라 상업용 수요도 크게 증가할 것으로 보인다.

소형 극저온 냉동기의 연구 및 개발하는데 있어서 기본방향은 compactness(충분히 작고 가벼울 것), 신뢰도(reliability), 수명(mean time before failure와 mean time before maintenance), 저소음, 조작의 간편성(simple operation), 고효율(high efficiency), 저가격(low cost), 저입력(low input power) 등이 있으며, 특히 중요한 것은 신뢰도와 수명이고, 그 다음이 크기(무게)와 가격이다. 이러한 방향에 따라 소형 경량의 수명이 긴 고성능 냉동기 개발될 것으로 보인다. 대체로 현재의 소형 냉동기의 수명은 2-4년 정도이다. 80년대 후반들어 투입되는 입력을 대폭 감소시키고 수명도 크게 연장한 기술로 demand-control system이 있는데, 그것은 극저온 냉동기가 냉각부에 가해지는 부하에 따라 냉동용량을 출력하도록 한 시스템이다.

4. 결론

재생형 극저온 냉동기의 종류와 작동원리 등을 간략하게 소개하였다. 21세기 이후 국내에도 소형 극저온 냉동기에 대한 수요가 급증할 것으로 예상되며, 이러한 측면에서 극저온 기술의 기본이 되는 냉동기의 개발 능력 및 제작기술의 확보가 조속히 이루어지기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. G. Haselden, 1971, "Cryogenic Fundamentals, Part 1, Part2", Academic Press, London and New York.
2. Rene A. Gaefer, 1989, "Cryopumping Theory and Practice", Clarendon Press. Oxford.
3. Klaus D. Timmerhaus and thomas M. Flynn, 1989, "Cryogenic Process Engineering", Plenum press.
4. G. Walker, 1989, "Miniature Refrigerator for Cryogenic Sensors and Cold Electronics", Clarendon Press. Oxford.
5. Randall F. Barron, 1985, "Cryogenic Systems", 2nd ed., Oxford Univ. Press.
6. G. Walker, 1983, "cryocoolers, Part 1, Part 2", Plenum Press, New York.
7. Israel Urieli, David M Berchowitz, 1984, "Stirling Cycle Engine Analysis", Adam Hilger Ltd. Bristol.
8. Guy K. White, 1979, "Experimental Techniques in Low-Temperatue Physics", Clarendon press. Oxford, 3rd edition.
9. Branislav s. Baclic, Peter J. Heggs, 1990, "Unified Regenerator Theory and Reexamination of the unidirectional Regenerator Performance", Academic press., Advances in heat transfer, Vol.20.
10. 1968, Advanced Heat Transfer, Academic Press, New York London, Vol. 5.
11. 1973, Advanced in Heat Transfer, Academic Press, New York Lodon, Vol.9.
12. W. M. Kays, A. L. London, "Compact heat Exchangers", McGraw-Hill Book comany New York, 2nd EDITION.
13. Bearnd D. Wood, 1982, "Applications of Thermodynamics", Addison-Wesley publishing company. 2nd EDITION.
14. 최현호 외 6인, 1989, "Cryopump 설계 및 제작기술 개발 I", 한국기계연구소, 과학기술처 연구보고서 UCN228-1234C.
15. 김영인 외 5명, 1989, "극저온용 냉동기 개발", 한국과학기술처 연구보고서 N552-3609-2.
16. 김영인 외 5명, 1990, "극저온용 냉동기 개발", 생산기술연구원, 과학기술처 연구 보고서 KAITECH BS PNR 0050-

- 00061-1.
17. 박종욱 외 6인, 1990, "고진공 및 초저온 기술에 관한 심포지움", 한국기계연구소.
 18. 김훈철 외 6인, 1991, "초저온 및 진공기술에 관한 심포지움", 한국기계연구소.
 19. 최현오 외 6인, 1989, "Cryopump 설계 및 제작기술 개발(I)" 한국기계연구소, 과학기술처 연구보고서 UCN228-1234C.
 20. 손정영 외 14인, 1994, "신경제 5계년 계획을 위한 미래 복합형 기술 개발 사업을 위한 사전조사(III)", 한국과학기술연구원, 과학기술처 연구보고서 UCQ39(3)-5136-9.
 21. 이춘식 외 12인, 1993, "고효율 에너지 변환·축적시스템 개발", 한국과학기술연구원, 상공자원부 연구보고서 UCM478-4780-2.
 22. 김영인, 장보선, 김용찬, 1989, "극저온 냉동기의 개발", 공기조화 냉동공학, 제18권, 제2호, pp.108~115.
 23. 박종철, 1989, "극저온 생성 및 dc SQUID 개발", 공기조화 냉동공학, 제18권 제2호, pp.116~120.
 24. 이금배, 백일현, 1989, "SQUID 냉동용 극저온 시스템의 개발", 공기조화 냉동공학, 제18권, 제2호 pp.121~129.
 25. 김영인, 장호명, 1989, "극저온 냉동기(1)", 공기조화 냉동공학, 제18권, 제6호, pp.507~514.
 26. 김영인, 장호명, 1990, "극저온 냉동기(2)", 공기조화 냉동공학, 제19권, 제1호, pp.7~18.
 27. 김영인, 장호명, 1990, "극저온 냉동기(3)", 공기조화 냉동공학, 제19권, 제3호, pp.175~183.
 28. 김영인, 장호명, 1990, "극저온 냉동기(4)", 공기조화 냉동공학, 제20권, 제1호, pp.60~74.
 29. 김영인, 장호명, 1990, "극저온 냉동기(5)", 공기조화 냉동공학, 제21권, 제2호, pp.88~99.
 30. 정은수, 1992, "맥동관 냉동기", 공기조화 냉동공학, 제21권, 제2호 pp.75~87.
 31. 이금배, 백일현, 1989, "극저온 냉동 시스템의 기본 원리", 대한기계학회 '89년도 추계학술대회 초록집, pp.522~527.
 32. 김영울, 이상용, 장호명, 김영인, 1992, "소형 Gifford-McMahon/Joule-Thomson 냉동기에서 열교환기의 최적조합", 대한기계학회 '92년도 춘계학술대회 초록집, pp.257~260.
 33. 김용원, 정평석, 김수연, 1992, "기계적 구동장치가 없는 재생기형 극저온냉동기의 제작", 대한기계학회 '92년도 춘계학술대회 초록집, pp.257~260.
 34. P.S. Jung, S.Y. Kim, "Development of a Simple Regenerative Type Cryocooler without Mechanical Driving Parts", JSME, Proceeding of 2nd JSME-KSME thermal Engineering Conference, pp. 303~306, 1992.
 35. 이석호, 김수연, 정평석, "전자제어식 재생기형 극저온 냉동기의 설계조건", 대한기계학회 '93년도 추계학술대회 논문집, 한양대(반월), pp. 418~412, 1993.
 36. 장일효, 김수연, 정평석, 최현오, "재생기에서 주기적 유동의 특성", 94년도 공기조화냉동공학회 하계학술대회 논문집, 중앙대, pp. 165~169, 1994.
 37. H.J. Goldsmid and A.S. Gray, 1979, "Thermoelectric Refrigeration at Very Low Temperatures", Cryogenics, pp. 289~292.
 38. A.W.Penn, 1968, "Cacaded Paltier Devices for Low Temperature Operation", Energy Conversion, Vol.8, pp. 65~69.
 40. 이강선, 정은수, 최현오, 1984, "오리피스 맥동관 냉동기의 수치적 해석", 공기조화 냉동공학, pp.282~290.
 41. 박성제, 고득용, 유창중, 염한길, 최현오, 1994, "Pulse Tube 냉동기 특성실

험”, 공기조화냉동공학회 하계학술대회
초록집, pp.185~191.

42. 1993, Proceedings of Fourth Joint

Sino-Japanese Seminar on Cryocoolers
and Concened Topics, Beijing, P.R.
China.