

극저온 냉동 시스템의 기본원리

이 금 배
한국동력자원연구소 선임연구원



●1952년생
●고다공성 물질에서 열 및 물질전달을 전공하였으며 보일러 및 각종 열교환기 최적설계에 관심이 있다

백 일 현
한국동력자원연구소 연구원



●1959년생
●극저온 냉동기의 설계 및 해석과 전반적인 에너지 전환기술에 관심을 가지고 있다

1. 머리말

극저온(cryogenic)이란 미국의 NBS에서 근무하는 한 과학자 -150°C (123K) 이하의 온도 영역으로 정의하였으며, 그 이유는 영구가스(permanent gas; He, H₂, Ne, N₂, O₂, etc)들이 이 온도 이하에서 액체로 변하기 때문이다. 따라서 이 온도 이하에서 작동하는 냉동 시스템을 극저온 냉동 시스템(cryogenic refrigeration system)이라 할 수 있다.

극저온 냉동 시스템은 우주산업에 필수적인 액체연료의 제조, space chamber 설치, 저온 초전도성 물질을 이용한 소자, 발전 및 핵융합 기술개발, 식품 및 의약품의 저장 및 극저온 냉동기술 개발, 초진공 펌프 제작, 강도 증진, 폐자원 활동등에 이용되고 있다. 미래에 극저온 냉동 시스템은 다방면에 걸쳐 상업화될 전망이다, 특히 첨단기술, 우주, 국방산업등에 지대한 영향을 줄 것이다.

그림 1은 극저온 기술에 대한 분류로서, 발생기술은 극저온 상태의 생성 및 그 현상을 유지시켜 주는 기술로 저온학에서 가장 기본되는 분야이며, 이때 극저온 상태에서 나타나는 특수한 현상들을 실용화에 적용시키는 기술들을 응용기술이며, 평가기준에 응용한 기술을 진단 기술이라 한다.

극저온 상태를 유지하려면 극저온 시스템에서 작동하는 고압의 냉매를 팽창시켜 원하는 최종온도까지 떨어뜨려야 하는데 극저온 시스템에서 이용되는 팽창방법은 주로 다음과 같은 두가지 방법이 많이 쓰이고 있다. 팽창밸브(expansion valve, or joule-thomson valve)를 이용하는 방법과, 팽창기(expander) 또는 팽창엔진(expansion engine)를 이용하는 방법이다.

J-T(Joule-Thomson) 밸브를 통한 팽창에서, 이상적인 경우 등엔탈피 팽창을 하며, 냉각정도를 J-T계수로 표현하는데, J-T계수가 양(positive)의 값을 가질때 냉각되며, 음(nega-

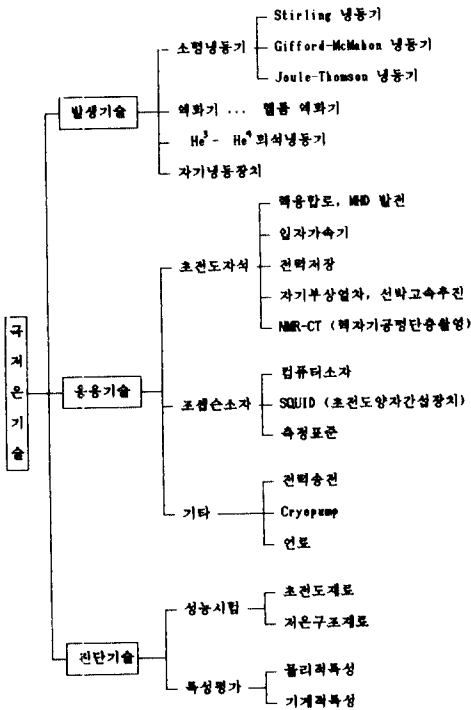


그림 1 극저온 기술계통도⁽¹⁾

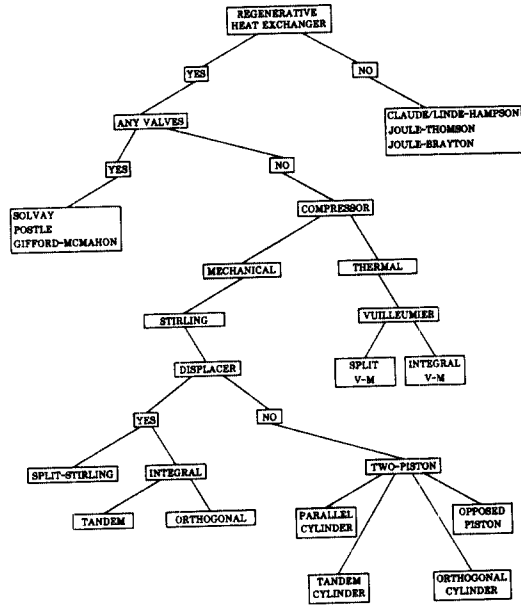


그림 2 극저온 냉동기의 분류

tive)의 값을 가질때 온도가 상승한다.

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h$$

팽창기 또는 팽창엔진을 이용한 팽창에서, 이상적인 경우 가역단열팽창(reversible-adiabatic expansion), 즉 등엔트로피 팽창(isentropic expansion)을 하며, 등엔트로피 팽창계수가 팽창 크기를 나타낸다.

$$\mu_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s$$

등엔트로피 팽창은 항상 온도감소를 얻을 수 있으나, 팽창밸브를 통한 팽창은 가스의 상전 위 온도(maximum inversion temperature)에 따라 온도가 감소할 수도 있고 상승할 수도 있다.

2. 극저온 냉동 사이클

생성된 액체를 시스템 밖으로 내보내는 사이

클을 개방사이클(open cycle)이라 하고, 이런 장치를 액화기(liquefier)라 부르며, 냉매가 내부에서 계속 순환되는 사이클을 밀폐사이클(closed cycle)이라 하며, 이런 장치를 냉동기(cryogenic refrigerator, or cryocooler)라 부른다. 그러나 두 장치의 기본원리는 같다.

냉동 시스템의 성능을 비교하는 여러 인자들 중 FOM(figure of merit)과 액체수율(liquid yield)이 있다. FOM은 시스템에 행해지는 이론적인 최소일대 실제일의 비로 정의되며, 액체수율은 실제 액화되는 양 대 총냉매량의 비로 정의되어진다.

냉동온도 123K이하에서 작동하는 극저온 냉동 시스템은 냉동온도, 냉동용량, 냉동방법, 시스템의 형태등 여러인자에 의해 분류할 수 있으나, 가장 대표적인 분류방법이 열교환기의 형태, 밸브의 사용유무 및 압축방식에 의한 분류로서 Walker⁽²⁾는 그림 2와 같이 분류하였다.

열교환 방법에 의해 분류하면 회수식(recuperative) 열교환기와 재생식(regenerative) 열교환

기로 분류할 수 있다. 회수식 열교환기는 두 유체가 상이한 통로를 통하여 열교환이 이루어지는 형태이며, 재생식 열교환기는 두유체의 흐름이 하나의 통로를 통하여 주기적으로 흐름으로써 열교환이 이루어지는 형태이다.

2.1 회수식 사이클(Recuperative Cycle)

(1) Linde-Hampson 사이클

이 장치는 19세기말 Linde-Hampson이 최초로 기체공기를 액체공기로 전환시킨 장치로써, 시스템의 주요 구성요소로는 압축기, 열교환기, J-T밸브, 저장용기로 되어있다. 이 사이클은 Linde, Hampson, Linde-Hampson, 또는 단순히 Joule-Thomson사이클이라고도 한다.

(2) Precooled Linde-Hampson 사이클

본 시스템은 Linde-Hampson 시스템에 예비 냉기(precooler)를 부착한 형태이다. 실제 네온, 수소, 헬륨은 상전위 온도가 상온이하이므로 팽창을 시키려면 상전위 온도이하를 유지하여야 하므로 예비 냉각기가 필수적이다. 주장치로는 압축기, 예비 냉각기, 열교환기, J-T 밸브, 저장용기를 들 수 있다.

(3) Linde dual-pressure 사이클

본 시스템은 Linde-Hampson 시스템에 이중 압축기를 사용하여 압축비를 감소시켜 요구되는 일량을 감소하였다. 그러나 일차 액화된 가스의 일부가 고압의 압축기로 재순환되기 때문에 액화수율도 감소한다. 주장치로는 중간압력 압축기, 고압 압축기, 열교환기, 중간압력 J-T 밸브 및 저장용기, 저압 J-T 밸브 및 저장용기를 들 수 있다.

(4) Claude 사이클

본 시스템은 Linde-Hampson 시스템에 팽창엔진을 부착하여 액화수율을 증대시킨장치이다. 주장치로는 압축기, 3개의 열교환기, 팽창엔진, J-T밸브 및 저장용기를 들 수 있다.

(5) Collins Helium Liquefaction 사이클

1940년 MIT 교수인 Collins가 Claude 시스템을 변형하여 최초로 상업화할 수 있는 액화

헬륨을 생성하였는데, 이는 손쉽게 액화헬륨을 생성할 수 있어 극저온 공학에 많은 발전을 가져오게 되었다. 본 사이클은 Claude 사이클을 보강한 형태로, 팽창기 2대를 사용하여 높은 액화수율을 얻을 수 있다. 주장치로는 압축기, 5대의 열교환기, 2대 팽창기, J-T밸브, 저장용기를 들 수 있다.

2.2 재생식 사이클(Regenerative Cycle)

(1) Ericsson 사이클

Ericsson 형태의 시스템은 재생식 열교환 형태로 밸브의 조절에 의하여 냉매의 흐름을 조절한다. Ericsson 사이클은 Solvay 형태와 G-M(Gifford-McMahon) or Postle 형태로 분류하는데, 두 형태의 근본적인 차이는 Solvay 형태는 팽창공간을 형성하기 위하여 왕복식 피스톤이 사용하므로 외부일이 필요하나, G-M or Postle 형태는 팽창공간을 형성하기 위하여 displacer을 사용하여 외부일이 필요없다.

(2) Stirling 사이클

Stirling엔진은 1816년 Stirling에 의하여 원동장치로 개발되었으나, 1834년 John Herschel에 의하여 냉동기로 제시되었으며, 최초로 냉동 시스템의 제작은 Alexander Kirk에 의하여 이루어졌다. 재생식 열교환 방식으로 밸브 없이 작동하는 Stirling시스템은 two piston engines, integral stirling, split stirling 형태로 구분할 수 있다. Stirling시스템의 대표적인 형태인 integral stirling으로 Philips시스템을 들 수 있다.

(3) Vuilleumier(VM) 사이클

VM 시스템은 1918년 Rudolph Vuilleumier에 의하여 개발되었으며, 여러가지 형태의 VM 시스템은 Bush⁽³⁾, Taconis⁽⁴⁾등에 의하여 개발되었다. VM 시스템은 Stirling 시스템과 작동원리가 비슷하나 압축방식에 있어 Stirling 시스템은 기계식압축기를 사용하나 VM 시스템은 열적 압축기를 사용한다. VM 시스템의 장점은 태양 또는 방사성 에너지를 이용할 수 있으며, 작동시 기계적 진동이 없어 장기간 우

주 탐축 장치의 냉각 시스템이나 진동을 요하지 않은 장치에 매우 효과적이다. 단점은 VM시스템의 고온원(hot source)에서 나오는 열을 제거하여야 하므로 Stirling 시스템보다 COP가 낮다.

이외에도 여러 극저온 냉동 사이클이 있으며 참고문헌에 자세히 기록되어 있다^(5,6).

3. 극저온 냉매

극저온 냉동시스템에서 사용되는 냉매는 아래와 같다.

(1) 헬륨

헬륨은 지상에서 가장 비점이 낮은 영구가스로서 헬륨 4와 헬륨 3으로 구분할 수 있다. 일반적으로 헬륨가스라 함은 헬륨 4를 가르키며 이중 헬륨 3은 1.3×10^{-4} %가 존재한다. 헬륨 4의 물성은 무색, 무취, 비점은 4.212K, 밀도는 124.8 kg/m^3 으로 물의 1/8, 증발열은 20.90 KJ/kg으로 물의 1/110이며, 상압에서는 온도를 0K까지 내려도 응고 될 수 없다.

(2) 수소

액체수소는 무색, 무취이며, 상압에서 비점 20.3K, 밀도 70.70 kg/m^3 으로 물의 1/4이며, 모든 액체 가스중 무게가 가장 가볍고, 가연성이 높아 공기중 전체부피의 18~59%일때 폭발한다. 수소는 자연상태에서 표준수소(normal hydrogen)와 중수소(detrium)가 분자부피 3,200:1로 존재하며, 또한 불안정한 삼중수소(tritium)가 존재하나 주기가 매우 짧은 방사능이기 때문에 자연계 속에 매우 적다.

(3) 질소

액체 질소는 무색이며, 상압에서 비점 77.36 K, 빙점 63.2K, 밀도 807 kg/m^3 이다. 분자량이 14인 질소는 질량이 14, 15인 2개의 동위원소가 존재하며 비율은 10,000:38이며 분리하기 매우 어렵다. 질소는 공기의 주성분으로 액체 공기의 추출에 의하여 제조된다.

(4) 산소

액체 산소는 고분자/긴 사슬 분자인 O_4 의 존재로 인하여 푸른색을 나타내며, 상압에서 비점 90.18K, 빙점 54.4K, 밀도 1141 kg/m^3 이

표 1 극저온 냉매의 물리적 특성

특성 냉매	비 점 (K)	임계점		삼중점		최대상전환온도 (K)	밀 도 (kg/m^3)	점 도 (kJ/kg-K)	잠 열 (kJ/kg)
		온도(K)	압력(atm)	온도(K)	압력(atm)				
헬륨 3	3.19	3.32	1.15	—	—	—	58.9	4.61	8.49
헬륨 4	4.214	5.20	2.26	—	—	45	124.8	4.48	20.90
수소	20.27	33.2	12.98	13.9	0.0711	205	10.79	9.68	443
네온	27.09	44.4	26.2	24.54	0.427	250	1206	1.83	85.9
질소	77.36	126.1	33.5	63.2	0.127	621	807.3	2.05	199.3
공기	78.8	133	38.7	—	—	603	874	1.96	250
불소	85.24	144.0	55.0	53.5	0.00218	—	1507	1.54	166.3
아르곤	87.28	150.4	48.3	83.8	0.679	722	1394	1.136	161.9
산소	90.18	154.6	50.1	54.4	0.0015	761	1141	1.695	213
메탄	111.7	190.7	45.8	88.7	0.099	939	424.1	3.461	511.5

다. 기체에는 자기력이 없으나 산소에는 약간의 자기력이 있어 혼합가스에서 산소의 존재는 자기력을 측정하여 알 수 있다. 분자량이 16인 산소는 질량이 16, 17, 18인 3개의 동위원소가 존재하며 비율은 10,000 : 4 : 20이다. 산소는 공기 중에서 질소 다음으로 많으므로 액화 공기에서 제조한다.

(5) 메탄

메탄은 천연가스 (LNG)의 주성분으로 물성은 무색이며, 상압에서 비점 11.7K, 빙점 88.7K, 밀도 424.1kg/m³이며, 가연성이 높아 공기 중에서 5.8~13.3%만 혼합되면 폭발의 위험이 있다.

(6) 기 타

극저온 냉매에는 이밖에도 네온, 프로린, 아르곤 등이 있으며, 이에 대한 물성치들은 표 1에서 자세히 보여주고 있다.

질소 이상의 비점(N₂, Air, O₂, etc.)을 가진 냉매는 상전위온도가 상온보다 크므로 J-T계수가 항상 양의 값을 가지지만, 네온 이하의

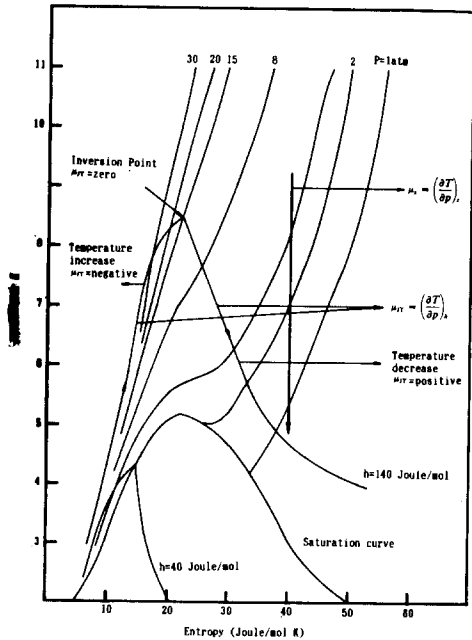


그림 3 T-S 선도에서 헬륨4의 냉동효과

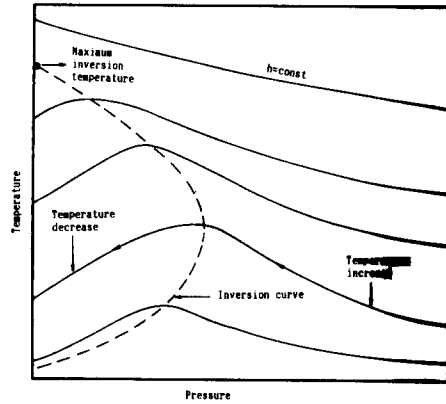


그림 4 실제 가스의 등엔탈피 팽창

비점(Ne, H₂, He)을 가진 냉매는 상전위 온도가 상온이하이므로 J-T밸브를 통과하기 전에 반드시 예냉기(precooler) 등을 이용하여 상전위온도 이하로 떨어뜨린 후에 J-T밸브를 통과시켜야 한다. 이와같은 원리를 T-S 선도에서 헬륨의 냉동효과를 나타낸 그림 3으로 설명하면, 엔탈피 140 J/mol에서 압력이 30기압에서 15기압으로 떨어질때 온도는 상승하지만 15기압에서 8기압으로 떨어질때 온도가 떨어짐을 알 수 있다. 압력이 떨어짐에 따라 온도가 상승하다가 떨어지는 점을 전환점이라 하며, 이점의 연속이 전환곡선(inversioncurve)이다.

그림 4는 T-P 선도에서 등엔탈피 팽창곡선으로 실선으로 된 곡선이 전환곡선으로 곡선의 좌측영역에서 냉동효과가 일어나며, 또한 냉동할 수 있는 최대온도는 전환곡선의 최대점인 상전위온도 이하의 온도를 유지하여야 한다.

4. Joule-Thomson 및 Gifford-McMahon 냉동 시스템

현재 상용화된 소형 냉동 시스템중 초전도 소자 개발등에 사용되는 냉동 시스템의 타입은 액체 헬륨온도(4.2K 이하)가 요구되는 경우 J-T타입과 G-M형태의 혼합형 냉동 시스템이 많이 사용되고 있고, 최저온도 15K 정도가 요

구되는 경우 G-M타입의 냉동시스템이 많이 사용되고 있다. 따라서 여기서는 이들 시스템에 대하여 좀더 자세히 설명하고자 한다.

4.1 Joule-Thomson 냉동 시스템

그림 5은 이상적인 간단한 J-T냉동 시스템의 개략도 및 T-S 선도를 보여주고 있다. J-T냉동기의 주요 부분은 압축기, 열교환기, J-T밸브, 증발기(evaporator)등으로 구성되어 있다. 과정(process) 1-2를 통하여 압력이 증가하고 온도는 압축기내에서 공기나 물등을 통하여 상온을 유지하도록 하고 있으나 실제로는 온도가 증가하고있다. 과정 2-2'은 예냉기를 통하여 압축된 냉매의 온도가 낮아지며, 이때 예냉기의 독립된 냉매로는 수소, 질소 또는 헬륨등을 사용하고 있으며, 예냉기는 독립된 냉동기로 G-M 형태의 냉동기를 사용하는 경우가 많다. J-T 냉동기의 냉매가 헬륨인 경우 예냉기가 필수적으로 부착되어야 한다. 과정 2'-3은 되돌아오는 낮은 온도의 냉매와 열교환이 이루어져 온도는 더 떨어지고 최종적으로 J-T밸브를 통하여(과정 3-4) 냉매가 액체로 전환된다. 증발기로부터 열을 흡수한 액체의 일부가 증발하여 가스로 되고 이 가스는 열교환기를 거쳐 다시 압축기로 돌아가 계속 과정을 반복한다.

J-T냉동기에 장점은 밸브에 제작 및 조작 과정이 간단하다. 팽창 엔진을 사용하게되면 엔진 안에서 이상(two phase) 상태가 되는 경우 엔진에 무리가 생기나 팽창 밸브를 사용할 경우 이런 문제가 쉽게 해결된다. 단점인 경우

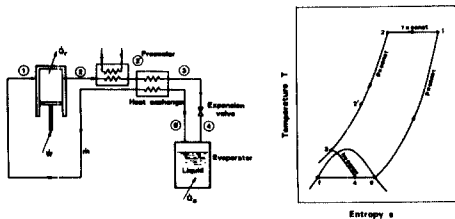


그림 5 이상 Joule-Thomson 냉동기의 작동원리 및 T-S선도

밸브에 오리피스가 매우작기 때문에(보통 $d = 1 \text{ mm}$ 정도) 냉매량이 작으며 따라서 용량이 작다. 또한 냉매에 불순물이 있으면 오리피스가 막힐 경우도 있다. 따라서 헬륨인 경우 순수도가 99.995%이상 되어야 한다.

J-T타입 극저온 열교환기에 이용되는 열교환기 형태로는 관형, 판형, 다공판형등이 있으나, 소형 냉동기 일때는 열교환기의 효율이 매우 높아야 하므로 상용화된 냉동기에서는 핀이 달린 이중 관형 열교환기(finnd double pipe heat exchanger)가 주로 사용되고 있다.

(1) Joule-Thomson 밸브

J-T밸브의 형태로는 고정형(fixed type)과 유량 자동조절형(regulating flow rate type)으로 대별되며, 고정형의 장점으로는 제작 및 조작이 간편하며, 단점으로는 적절한 유량을 조절할 수 없이 필요한 양 이상의 액체 생성시 손실을 유발하며, 오리피스 크기가 너무 작을 경우 불순물에 의한 관의 막힘 현상을 야기시킨다. 유량 자동조절형의 장점은 유량을 자유로히 조절할 수 있어 필요 이상의 액체의 생성을 줄일 수 있으며, 유량조절은 온도감지장치를 이용하는데, 온도 감지 장치로 벨로즈(bellow), 열팽창계수가 다른 물질등이 이용되고 있다. 단점으로는 구조가 매우 복잡하여 제작 및 파손시 보수가 어렵다.

그림 6은 유량자동조절형 J-T밸브를 보여주고 있으며^(7,8), 구성요소로는 온도조절장치(micrometer adjustment), 온도감지장치(temp. sensitive structural components), J-T 밸브(annular J-T flow orifice)의 세부분으로 나

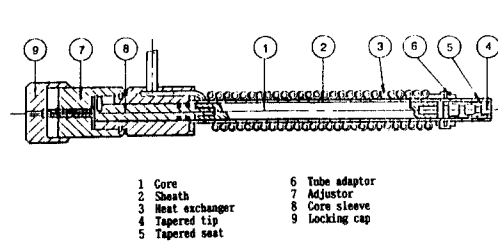


그림 6 유량자동 조절형태인 원환 J-T 팽창 밸브

눌 수 있다. 온도감지장치에 의해 유체의 온도가 감지되어 온도조절장치로 전달되어 이에 의해 유량의 양이 조절되어 밸브를 통해 팽창하게 된다. 장점으로서는 팽창하는 유체내에서 응축된 불순물을 labyrinth spoiler를 가진 테이퍼된 원환(tapered annulus)를 사용하여 쉽게 제거할 수 있다.

4.2 Gifford-McMahon 냉동기

그림 7은 이상적인 간단한 G-M 냉동 시스템의 개략도 및 T-S 선도를 보여주고 있다. G-M 냉동기의 부분은 압축기, 재생기(regenerator), 팽창기(displacer), 밸브, 증발기등을 들 수 있으며 밸브의 조작에 의하여 일정한 온도 및 압력 사이클을 형성하며 작동한다. 과정 1-2은 displacer가 실린더 하단에 있는 상태에서 흡입밸브가 열려 압축기에서 나온 고압의 가스가 시스템으로 들어간다. 과정 2-3은 흡입밸브가 계속 열린 상태에서 배출밸브는 닫히고 압축된 가스는 재생기를 통하여 온도가 떨어진 상

태하에 실린더 하단으로 들어가며, 이때 displacer은 실린더 상단으로 움직인다. 과정 3-4은 displacer가 실린더 하단에서 상단으로 이동됨에 따라 가스가 단열팽창하므로 압력 및 온도가 떨어진다. 이때 displacer가 실린더 상단에 위치하였을때 흡입밸브는 닫히고 배출밸브는 열린다. 과정 4-5-1은 displacer가 실린더 하단으로 움직임에 따라 저온 가스가 증발기에서 열을 흡수하고, 재생기에서 열교환을 한후, 상온 상압 상태하에 압축기로 되돌아간다.

G-M 형태는 Solvay 형태의 단점을 보완한 냉동시스템으로써 다음과 같은 장점을 가지고 있다⁽⁹⁾. 낮은 운전속도(60~150rev/min)를 가지므로 밀봉과 시스템의 마멸 및 손상이 매우 작아 평균수명이 10,000 운전시간 이상으로 매우 길다. Stirling냉동 시스템과 달리 압축기가 분리되어 있어 진동을 감소 시킬 수 있다. 밸브와 밀봉을 상온에서 사용한다. 재생기의 효율이 좋고, 제작하기가 쉽다. 한통로를 통하여 흐름의 방향이 주기적으로 변하므로 재생기에 응축된 불순물을 쉽게 제거할 수 있다.

(1) APD사 모델:CS-202

그림 8은 APD(advanced products division cryogenics, inc.)사 제품인 Gifford-McMahon 형태의 냉동기 모델 CS-202를 보여주고 있으며, G-M/J-T 혼합형 냉동기의 예냉기로도 많이 사용되고 있다. 이 냉동 시스템은 적당한 냉동용량과 원하는 온도에서 샘플의 실험을 수행할 수 있도록 설계된 냉동 시스템이며, 냉매로는 헬륨을 사용한다. 최저온도 15K에 냉동용량 1W, 최저온도 20K에 냉동용량 2W, 최저온도 77K에 냉동용량 10W이며, 최저온도를 얻는데 40분정도 걸린다.

기본적으로 4요소인 압축기, 팽창기/재생기, 제어기, 진공펌프와 그밖에 보조장치등으로 구성되었다. 극저온 냉동시스템의 응용분야는 vacuum shroud와 sample holder의 형태에 따라 결정된다.

그림 9는 팽창기의 주요 부분을 보여주고 있

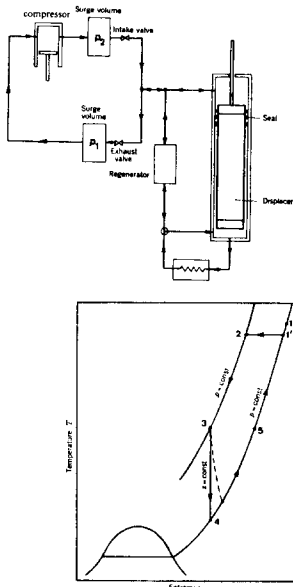


그림 7 이상 Gifford-McMahon 냉동기의 작동원리 및 T-S선도

CS-Series Closed-Cycle Systems

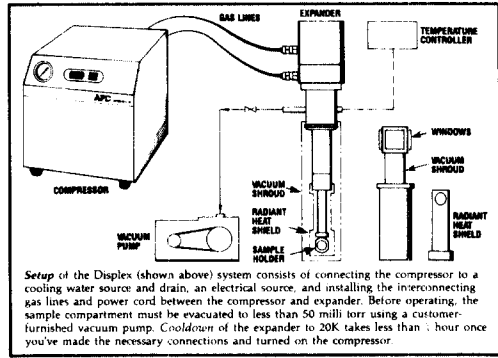
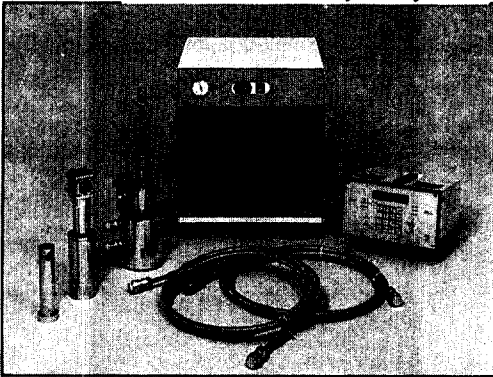


그림 8 APD 사 모델 : CS 202

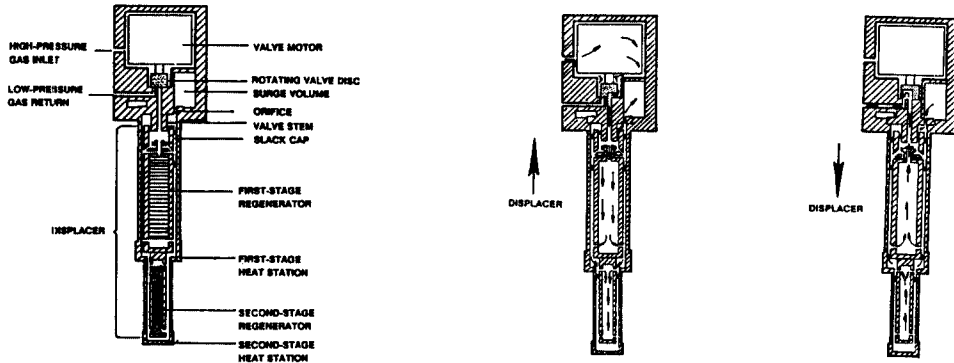


그림 9 Gifford-McMahon 냉동기의 팽창과정의 다이어그램

으며, 흡입, 배출을 하는 동안 가스의 흐름과 displacer의 작동을 보여주고 있다. 자세한 작동원리는 참고문헌에 기록되어있다⁽¹⁾.

4.3 혼합형 Joule-Thomson/Gifford-McMahon 냉동 시스템

4.2K 근처에서 작동하는 냉동기의 형태로는 Cascade Joule-Thomson 냉동기, Reciprocating Brayton/Joule-Thomson 냉동기, Joule-Thomson/Gifford-McMahon 냉동기등을 들 수 있다. 이들 냉동기중에서 소형냉동기로는 위에서 기술한 J-T 냉동기와 G-M 냉동기의 혼합형인 J-T/G-M 극저온 냉동기가 많이 사

용되고 있다.

J-T/G-M 냉동기의 장점은 시스템의 내구성이 좋고, 유지비용이 저렴하며, 비교적 낮은 압력하에서 작동하므로 소형의 압축기를 사용할 수 있고, 사이클이 간단하며 시스템의 재현성이 좋다.

그림 10은 J-T/G-M 혼합형 냉동기의 개략도 및 이상적인 T-S 선도를 보여주고 있다. 본 냉동기는 최저온도를 얻을 수 있는 J-T 냉동기(압축기, J-T 열교환기, J-T 밸브, 증발기)와 팽창엔진에 의해 작동되어지는 G-M 냉동기(압축기, 팽창기/재생기)로 구성되어 있다. 전과정을 살펴보면 J-T 순환은 1단 및 2

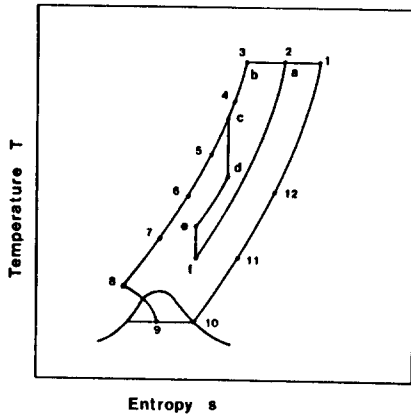
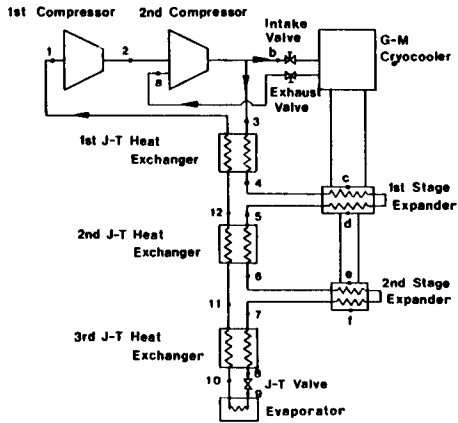
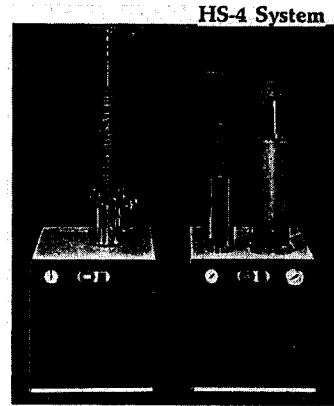


그림 10 이상 J-T와 G-M 혼합형 냉동기의 작동 원리 및 T-S선도

단 압축기에서 압축된 가스가 1단, 2단, 3단의 J-T 열교환기 및 G-M 냉동기의 열교환기를 통하여 온도를 떨어뜨린후, J-T 밸브를 통하여 기체 헬륨이 이상(two phase) 상태로 전환된다. 증발기에서 열을 흡수한 액체헬륨의 일부가 기체화되어 열교환기를 통하여 1단 압축기로 되돌아 간다. G-M 순환은 2단 압축기에서 압축된 가스가 1단, 2단 팽창기를 통하여 단열팽창후 J-T 열교환기와 열교환후 2단 압축기로 되돌아 간다.

(1) APD 사 모델 : Heliplex-4

그림 11은 APD(advanced products division



Heliplex[®] HS-4 schematic

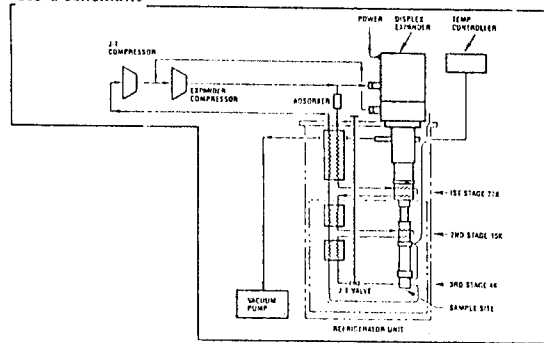


그림 11 APD 사 모델 : Heliplex-4

cryogenics, inc.)사 모델 Heliplex-4시스템을 보여주고 있다. 이 시스템은 G-M/J-T 냉동기의 혼합형인 헬륨 냉동기이다. 최저온도 3.6 K까지 얻을 수 있으며, 4.2K에서 냉동용량은 1W이다. 구성체는 J-T순환과 G-M 순환에서 각각 사용되는 압축기 2대, 팽창기(여기에서 G-M 및 J-T 열교환기, J-T 밸브가 모두 포함되어 있음), Radiation shield, Vacuum shroud등이 그림에서 보여주고 있다.

일단에서 사용되어지는 냉각동력은 이단에서 black-body 복사 열부하를 최소화기 위해 복사 시일드로 부터 반사되는 열을 흡수하는데 사용되어진다. 복사 시일드내에서는 77K를 유지토

록 되어 있다. cold head(그림 8 참조)에 부착된 vacuum shroud는 대기상태로 부터 cold head를 격리 시켜준다. 매우 낮은 온도에서 작동하기 때문에 vacuum shroud 없는 상태에서 발생하는 대류 열전달을 최소화하기 위해 고진공의 절연체가 필요하다. 이런 이유에서 진공체비내에서 1pa(10^{-4} torr) 이하의 압력을 유지해야한다.

5. 맺음말

극저온 냉동기술은 최첨단 산업에서 여러 방면에 걸쳐 실용화 되고 있으며 상업화도 많이 되고 있다. 또한 앞으로의 응용범위는 더욱 확대될 전망이기 때문에 미래에 첨단 및 우주시대를 맞이하여 국가주도 아래 적극적으로 육성 발전시키는 것이 절대적으로 필요하다고 본다.

본 내용은 1989년에 과학기술처의 지원하에 수행한 중점과제인 극한기술 분야중 극저온 기술분야에 속하는 특정과제 "SQUID 냉각장치용 극저온 시스템 개발연구"의 일부분이다.

참고 문헌

- (1) 이금배, 백일현, 1989, "SQUID 냉각장치용 극저온 시스템 개발연구", 과학기술처 특
- (2) Walker, G., 1984, "Classification of Cryocoolers", Proceedings of the third Cryocooler Conference, NBS, pp. 65~70.
- (3) Bush, V., 1938, "Apparatus for Heat Transfer", U.S. Paten No. 2,127, 286, August 16.
- (4) Taconis, K.W., 1951, "Process of and Apparatus for Heat Pumping", U.S. Patent No. 2,567, 454, Sep. 11.
- (5) Barron, R.F., 1985, Cryogenic Systems, 2nd edition, Oxford Uni. Press, Inc.
- (6) Walker, G., 1983, Cryocoolers, Part 1 & Part 2, Plenum Press.
- (7) Hedegard, K., Walker, G., and Zylstra, S., 1986, "Temperature Sensitive Variable Area Flow Regulator for Jourle-Thomson Nozzles", Proceeding of the International Cryocooler Conference, NBS, pp. 217~227.
- (8) Walker, G., 1985, "Joule-Thomson Apparatus with Temperature Sensitive Annular Expansion Passageway", U.S Patent Application No. 793, 268.
- (9) Thirumaleshwar, M. and Subramanyam, S. V., 1986, "Heat Balance of Single Stage Gifford-McMahon Cycle Cryorefrigerator", Cryogenics, Vol. 26, pp. 189~195.

