

극저온 냉동기술



최 현 오
(공기조화 연구실장)

- '78. 2 서울대학교 핵 공학과(학사)
- '81. 2 한국과학기술원 기계공학과(석사)
- '86. 2 한국과학기술원 기계공학과(박사)
- '86. 3-현재 한국기계연구소 선임연구원



고 득 용
(공기조화연구실 선임연구원)

- '82. 2 한양대학교 기계공학과(학사)
- '85. 2 한양대학교 기계공학과(석사)
- '85. 3-현재 한국기계연구소 선임연구원



김 익 생
(공기조화연구실 연구원)

- '85. 2 중앙대학교 기계공학과(학사)
- '87. 2 중앙대학교 기계공학과(석사)
- '90. 4-현재 한국기계연구소 연구원

1. 머리말

현재 통상적으로 사용하고 있는 "cryogenics" 또는 "cryo-"라는 접두사가 붙은 용어는 액화 천연가스 온도인 약 120K 이하의 온도에서 사용되거나 일어나는 모든 현상, 공정, 기술, 장치등을 지칭하고 이 글에서는 극저온이라 표기하기로 한다. 극저온의 분야별 온도 범위와 특징적인 현상을 그림 1에 대수 스케일(logarithmic scale)의

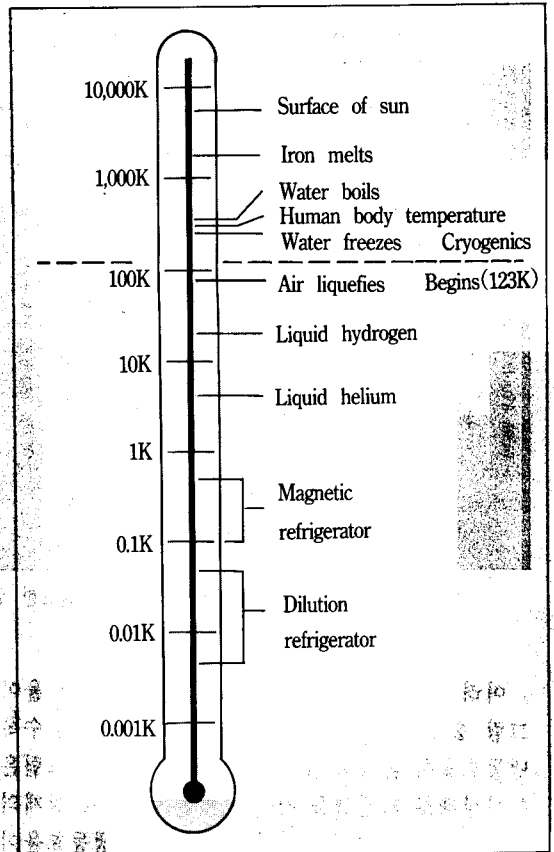


그림 1) 온도의 분류(대수 온도계)

온도계로 예시하였다.

초기의 극저온 냉동기술은 냉동에 필요한 온도에 따라 질소(76K), 수소(20K), 헬륨(4.2K) 등을 액화하여 이 액체를 수송·저장하고 이를 냉동이 필요한 분야에 공급하여 이용하였으나, 1970년대 이후 극저온 기술은 과학적 연구분야에서 뿐만 아니라 군사, 우주항공, 의료, 진공, 에너지, 수송 관련 분야 등에 응용으로 급속히 발전하여 다양한 극저온 냉동기가 개발되었으며, 그 온도 범위도 120K 부터 He³을 이용한 희석식 냉동기의 10⁻²K에 이르기까지 그 범위가 넓다.

극저온 온도는 통상 다음과 같이 6단계로 분리한다.

- Level 1: 60-120K Level 2: 20-60K
- Level 3: 10-20K Level 4: 4-10K
- Level 5: 1-4K Level 6: less than 1 K

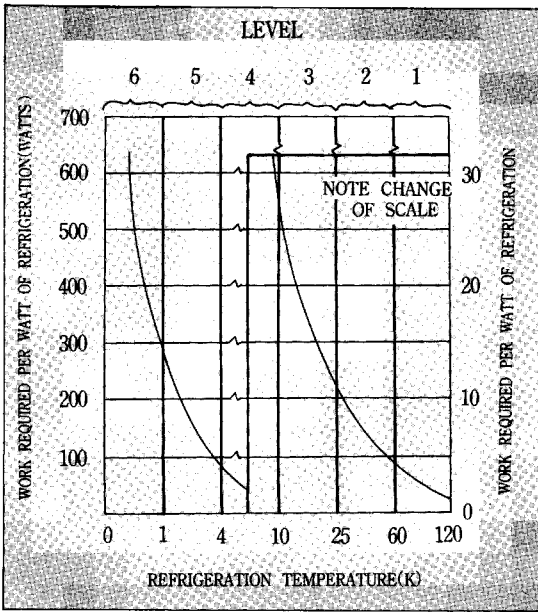


그림 2) 극저온 도달온도와 이에 필요한 일

이러한 각 단계별 작동온도에 따른 냉동효율이 그림 2에 나타나 있다. 작동온도가 낮아질수록 냉동효율이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이 그림은 이상상태로 가정했을 경우의 이론치이므로 실제의 경우는 극저온으로 갈수록 이보다 냉동효율이 훨씬 낮아진다. 따라서 극저온 냉동의 어려움이

얼마나 큰가를 알 수 있다.

이 글에서는 이와 같은 극저온의 응용기술, 극저온을 발생하는 여러가지 극저온 냉동기의 종류 및 원리와 국내외 기술동향에 대하여 설명하기로 한다.

2. 극저온 냉동기의 응용분야

극저온의 온도 영역에서는 모든 물질의 물리적·기계적 성질이 상온에서와 다른 양상을 보이고, 특히 일부 물질들에서는 초전도(Superconductivity) 현상이 나타난다. 이러한 극저온 응용 분야를 살펴보면 다음과 같다.

1) 적외선 센서의 냉각

극저온 냉동기의 가장 큰 응용분야는 night vision이나 missile guidance를 위한 적외선 센서(infrared sensor)의 냉각과 같은 군사용이다. 이러한 센서의 대부분은 HgCdTe, InSb, 또는 PtSi와 같은 물질로써, 정확한 성능을 발휘하기 위해서는 약 80K 온도에서 0.1-1.0W의 냉동능력(refrigeration capacity)을 요한다. 이러한 응용분야에서는 Stirling cryocooler를 많이 사용하고 있으며, 현재는 군사용 뿐만 아니라, thermographic scanning등의 민간용으로도 많이 사용된다.

2) 고진공 관련산업

극저온 냉동기의 상업적 응용의 가장 큰 분야는 극저온 진공펌프(cryopump)의 냉각용이다. 극저온 진공펌프는 극저온으로 냉각된 고체표면에 기체 분자를 응고, 흡착시킴으로써 진공을 발생시키는 진공펌프로써 고집적 반도체 생산공정에 필요한 고진공 펌프용으로 많이 사용된다. cryopump에는 주로 20K 근방에서 1-15W의 냉동능력을 갖고 있는 2단 Gifford-McMahon cryocooler를 주로 사용하고 있다.

3) 에너지 관련산업

극저온으로 냉각된 초전도체를 이용하여 대단히 높은 전류밀도를 얻는 초전도 발전과 Tokamak 융합로를 이용한 핵융합 발전이 대표적 응용사례이다. 또한 극저온을 이용하여 효율적인 전력의 송전과 에너지 저장이 가능하며, 최근 많은 관심을 끌고 있는 수소 에너지 이용을 위하여 극저온을

이용한 액화·저장기술이 필요하다.

4) 의료산업

혈액, 인체의 여러조직이나 골수 등을 장기 보존하기 위한 극저온 저장(cryoreservation)기술과 Parkinson씨병 등의 치료를 위한 극저온 수술(cryo-surgery)은 이미 알려져 있고, 1980년대에 들어와 최신 의료기기로써 핵자기 공명의 원리를 이용한 종합진단기기인 자기공명영상(MRI, magnetic resonance imaging) 시스템이 개발되었는데, 여기에 사용되는 액체 헬륨 dewar의 shield 냉각용으로 2단 Gifford-McMahon(G-M) cryocooler 또는 GM/JT(Joule-Thomson) cryocooler가 사용된다.

5) 자기부상열차

시속 500km 이상의 자기부상열차(magnetic levitation train)에 사용되는 초전도체의 극저온 냉각을 위해서도 극저온 냉동기에 의한 초전도체의 냉각이 필수적이다.

6) 과학연구분야

물리학 연구를 위한 입자가속기, 충돌기 등에 이용되는 초전도체의 냉각과 초미량의 자기, 전압 등의 측정에 표준이 되는 초전도 양자 간섭장치(SQUID, superconducting quantum interference device)에도 극저온 냉동기에 의한 냉각이 필요하다.

7) 우주항공분야

우주선의 추진연료로써 극저온으로 냉각된 액체산소와 액체수소가 이용된다. 또한 깊은 우주 공간에 떠 있는 인공위성과의 교신을 위한 분자 증폭기(maser amplifier)의 감도는 증폭기 부품들의 극저온 냉각을 통해서 크게 향상될 수 있다.

3. 극저온 냉동기의 종류 및 원리

현재 운용되고 있는 극저온 냉동기는 여러가지 타입이 있으며 압축·팽창방식, 열교환기 방식, 작동유체 제어방식에 따라 종류가 다양하다. 압축·팽창방식에 따라서는 rotary type과 reciprocating type으로 나눌 수 있고 열교환 방식에 따라서는 recuperative 열교환기와 regenerative 열교환기 방식이 있으며 작동유체의 제어에 따라서는 밸브에 의해 조절되는 Ericsson type과 볼륨 변화에 의해 조절되는 Stirling type으로 구별할 수 있다.

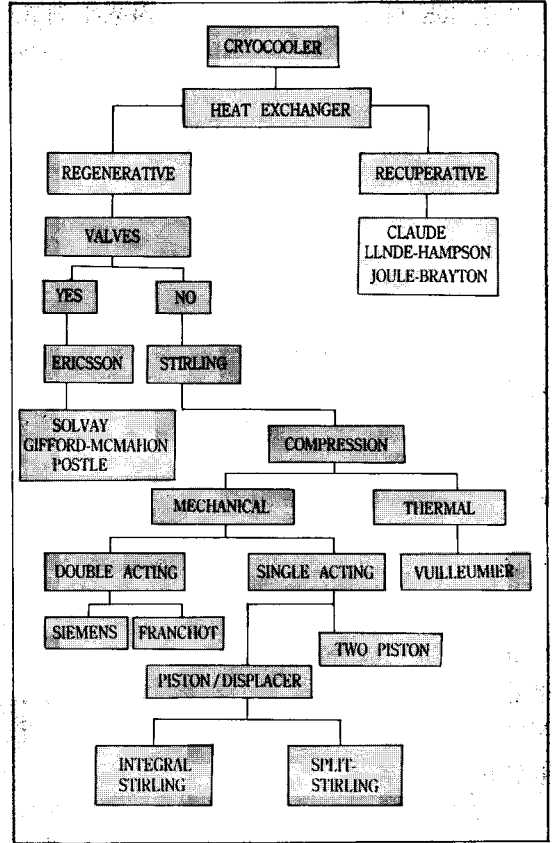


그림 3) 극저온 냉동기의 분류

그림 3은 극저온 냉동기의 종류를 나타내는 그림으로써 열교환기의 종류에 따른 분류와 작동유체의 제어에 따른 분류를 나타내고 있다.

Recuperative 열교환기는 두개나 그 이상의 열수송 매체가 서로 다른 통로를 흐르며 열을 교환하지만 regenerative 열교환기는 하나의 통로를 시간 간격을 두고 고온과 저온의 유체가 교대로 흐르며 재생기 재료에 열을 흡수·방출하며 열을 교환한다. Regenerative type은 recuperative type에 비하여 1) 단위 부피당 열전달 면적이 넓어 효율이 높고, 2) 제작이 용이하며, 3) 한 공간을 유체가 왕복하므로 불순물의 응착을 줄일 수 있는 장점이 있고, 단점으로는 1) 고체인 재생기(regenerator) 재료의 열용량이 20K 이하에서는 급격히 감소하므로 열교환 효과가 감소하고, 2) 유체의 압력강하가 많다는 점이다. 따라서 regenerative type은

소용량, 10K 이상의 냉동기에 주로 사용이 되고, recuperative type은 대용량, 10K 이하의 온도에 많이 쓰이고 있다.

이 글에서는 그림 3에 보여준 여러가지 타입의 냉동기 중 현재 많이 사용되고 있는 몇몇 소형 극저온 냉동기에 대하여 설명하기로 한다.

3.1. Solvay cryocooler

Solvay 냉동기는 팽창기(expander, 피스톤과 실린더), 재생기(regenerator), 입·출구밸브, 압축기로 구성되어 있고 그 개략도를 그림 4에 나타내었다. Solvay 냉동기의 작동 사이클은 다음과 같다.

- 1) 압력증가 : 입구측 밸브가 열려 고압가스가 유입되면서 이미 실린더 내에 존재하고 있는 가스를 압축한다.
- 2) 흡입행정 : 피스톤이 상승하면서 고압가스가 유입되고, 이 가스는 재생기를 통과하면서 냉각되어 압력이 떨어져 이를 보충하는 가스가 더 유입된다.
- 3) 팽창행정 : 입구측 밸브가 닫히고 피스톤이 계속 상승하면서 가스가 팽창하고 온도가 떨어진다.

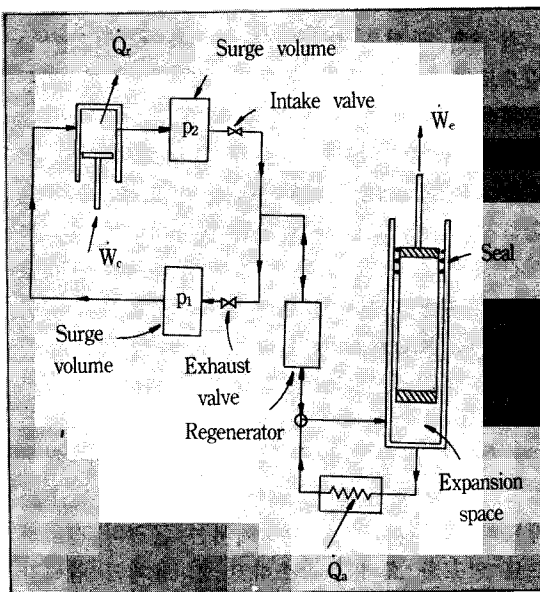


그림 4) Solvay 냉동기의 개략도

- 4) 배기행정 : 출구측 밸브가 열리고 피스톤이 하강하면서 팽창된 가스를 배출한다. 이때 배출되는 가스는 재생기를 통과하면서 온도가 상승되어 압축기로 되돌아 간다.

3.2. Gifford-McMahon cryocooler

Solvay 냉동기는 팽창기만으로 유체의 팽창일을 얻어 내야만 하므로 소위 work absorbing 시스템에 큰 부하를 주어야만 한다. 즉, 많은 경우에 유체는 상당히 높은 압력으로 운전하게 되고 팽창기의 팽창과정에서 상당한 힘으로 피스톤을 지지하며 팽창운동을 해야 하는데, 극저온 영역에서의 이러한 장치는 제작하기가 무척 어렵다. 이런 어려움을 극복하기 위하여 개발된 냉동기가 G-M 냉동기이다. 그림 5에 G-M 냉동기의 개략도를 보여주었다. 그림에서 알 수 있듯이 Solvay 냉동기와 다른 부분은 재생기와 팽창기가 연결되어 있는 점이다. 이와 같은 변화로 팽창기의 피스톤은 왕복기(displacer)가 되어 양단의 압력차가 매우 작고 왕복운동이 용이하게 된다.

G-M 냉동기의 T-s 선도는 그림 6과 같고 작동원리는 다음과 같다.

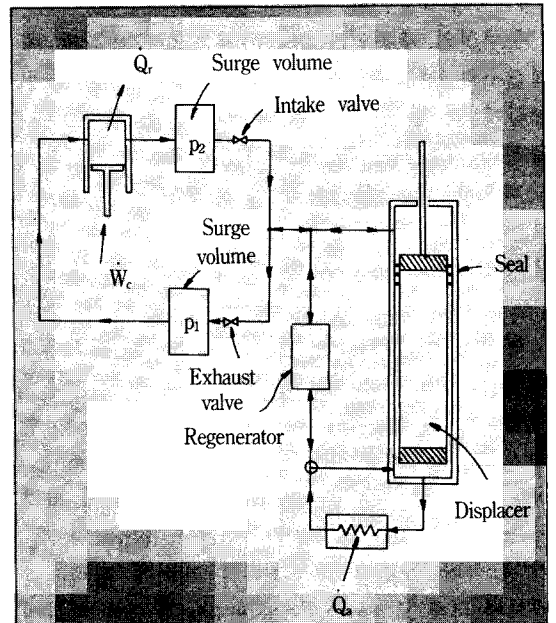


그림 5) Gifford-McMahon 냉동기의 개략도

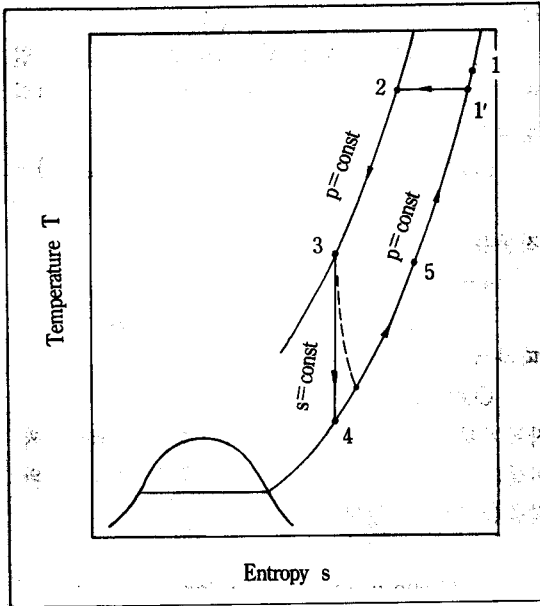


그림 6) Gifford-McMahon 냉동기의 한 사이클에 대한 T-s 선도

- 1) 과정 1-2: 입구측 밸브가 열려 가스가 재생기와 왕복기의 윗 부분을 채워 저압 p_1 에서 고압 p_2 로 상승한다.
- 2) 과정 2-3: 입구측 밸브 open, 출구측 밸브 close 상태에서 왕복기가 상승한다. 이때 왕복기의 윗 부분에 있는 가스는 재생기를 통하여 왕복기 하단으로 유입된다. 유입가스는 재생기를 통과하면서 냉각되므로 팽창기로 가스가 더 유입된다.
- 3) 과정 3-4: 왕복기가 팽창기의 최상단에 위치하고 입구측 밸브 close, 출구측 밸브 open 상태로 되어 팽창기 내의 가스가 팽창하여 초기 압력 p_1 으로 떨어진다. 이 과정에 의하여 팽창기 하부가 극저온으로 냉각된다. 이 과정을 Simon 팽창이라 한다.
- 4) 과정 4-5: 왕복기 하부의 극저온 가스가 왕복기의 하강운동으로 재생기를 통과하며 열을 흡수하여 압축기로 되돌아 간다.

전 과정을 가역과정이라 하고 작동유체를 이상기체라고 가정하면 이 시스템에 필요한 정미일(net work)은 다음과 같다.

$$-W/m = [T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$

또한 저온부에서 빼앗은 열량은 다음과 같다.
 $Q_c/m = (m_c/m) (h_5 - h_4)$
 따라서 이상적인 G-M 냉동기의 성적계수는
 $COP = (m_c/m) (h_5 - h_4) / [T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$ 가 된다.

3.3. Stirling cryocooler

Stirling 냉동기는 소형 냉동기 뿐만 아니라 80K 이상의 중형 내지는 대형 냉동기에도 매우 많이 쓰이고 있다. 그 이유는 고온의 압축부와 저온의 팽창부를 재생기로 연결함으로써 열적 성능이 뛰어나고 저온의 고압유체가 외부에 일을 하면서 팽창을 하므로 효율이 다른 냉동기에 비하여 대단히 우수하기 때문이다.

대표적인 Stirling 냉동기인 Philips 냉동기는 그림 7과 같이 피스톤, 왕복기(displacer), 재생기로 구성된 실린더 형태이다. 냉동 사이클은 그림 8과

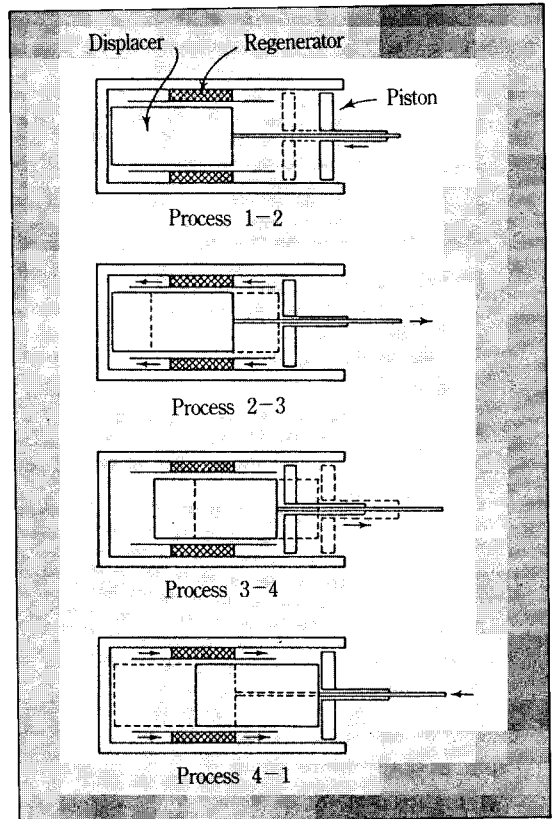


그림 7) Philips 냉동기의 개략도 및 작동 순서

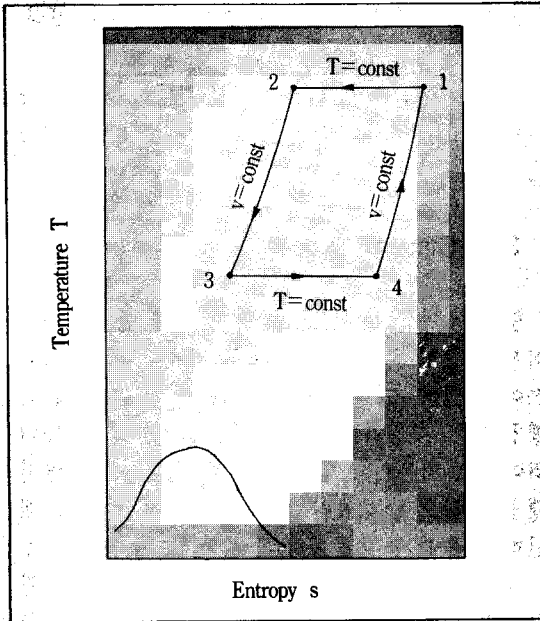


그림 8) Philips 냉동기의 한 사이클에 대한 T-s 선도

같은 T-s 선도로 표시할 수 있고 작동원리는 다음과 같다.

- 1) 과정 1-2: 피스톤이 좌측으로 움직이며 가스가 외부로 열을 방출하면서 등온압축된다.
- 2) 과정 2-3: 왕복기가 우측으로 움직이면서 가스는 재생기를 통하여 좌측 체적으로 이동한다. 이 과정에서 가스는 등체적 냉각되고 가스로 부터 방출된 에너지는 재생기에 저장된다.
- 3) 과정 3-4: 피스톤과 왕복기가 동시에 우측으로 움직이면서 가스는 등온팽창한다. 이 과정에서 실린더의 좌측부가 극저온으로 냉각된다.
- 4) 과정 4-1: 왕복기가 좌측으로 이동하면서 저온 가스는 재생기를 통하여 우측으로 이동한다. 이 과정에서 저온 가스는 재생기의 열을 흡수하여 1의 상태로 되돌아 간다.

전 과정을 가역과정이라고 가정하면 열역학 제 2법칙에 의해서

$$\text{외부로 전달한 열 } Q_c = mT_1(s_2 - s_1) \text{ 이고}$$

$$\text{외부에서 흡수한 열 } Q_h = mT_3(s_4 - s_3) \text{ 이}$$

다.

열역학 제1법칙에서 한 사이클 당 정미 일 $W_{net} = Q_c + Q_h$ 이므로 이상상태의 Philips 냉동기의 성적계수는 다음과 같다.

$$COP = -Q_c / W_{net} = T_3 / [T_1(s_1 - s_2) / (s_4 - s_3) - T_3]$$

작동유체를 이상기체로 가정하면

$$s_1 - s_2 = c_v \ln(T_1/T_2) + R \ln(v_1/v_2)$$

$$= R \ln(v_1/v_2) = R \ln(v_4/v_3) = s_4 - s_3$$

따라서

$$COP = T_3 / (T_1 - T_3)$$

작동기체를 이상기체로 가정할 경우 Stirling 사이클의 성적계수는 Carnot 사이클의 성적계수와 같음을 알 수 있다.

3.4. Vuilleumier cryocooler

VM 냉동기는 Stirling 냉동기의 기계식 압축기를 열적 압축기(thermal compressor)로 대체한 극저온 냉동기이다. 따라서 VM 냉동기는 구동원을 전기뿐만 아니라 태양열, 폐열, 가스 등을 사용할 수 있으므로 많은 관심을 끌고 있다. 그림 9와 그림 10에 VM 냉동기의 개략도와 T-s 선도를 나타내었고, 이상적인 VM 냉동기의 작동원리는 다음과 같다.

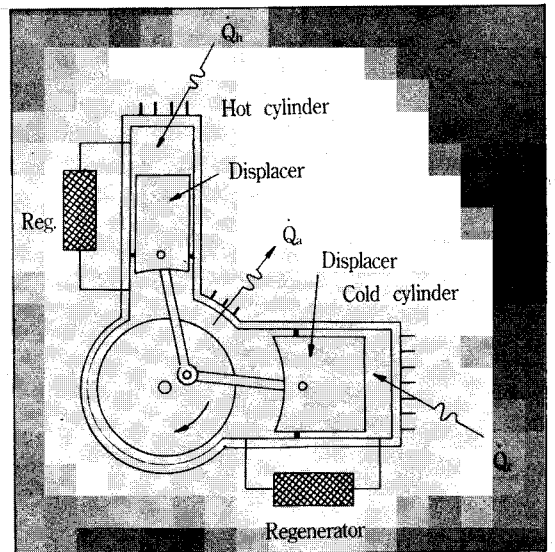


그림 9) Vuilleumier 냉동기의 개략도

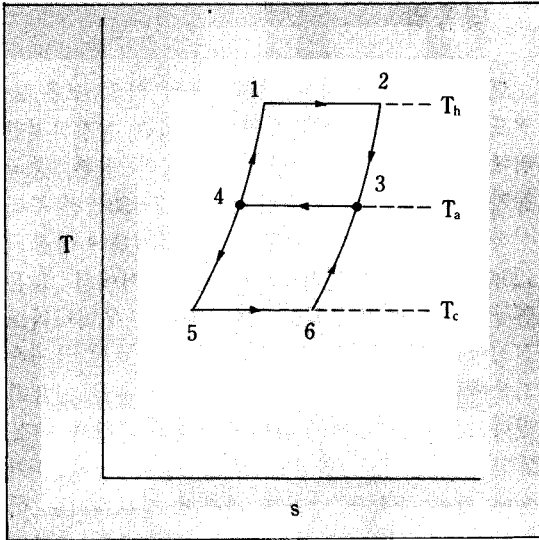


그림 10) Vuilleumier 냉동기의 한 사이클에 대한 T-s 선도

고온 열원으로 부터 고온측 실린더 내의 가스로 열이 유입되고(과정 1-2), 동시에 상온의 가스가 intermediate volume으로 부터 재생기를 통과하여 고온측으로 유입된다(과정 4-1). 고온측 왕복기가 상부로 움직이면서 고온측 가스가 intermediate volume으로 이동한다(과정 2-3). 일정 온도 T_a 를 유지하기 위하여 intermediate volume으로 부터 열이 방출된다(과정 3-4). 저온측 왕복기가 좌측으로 이동하고, 저온측 가스가 T_c 의 일정온도를 유지하기 위해서 저온 열원으로 부터 열을 흡수하고(과정 5-6), 동시에 intermediate volume 내의 가스가 저온측 재생기를 통과하여 저온측으로 유입된다(과정 4-5). 저온측 왕복기가 우측으로 이동하면서 저온측의 가스가 재생기를 통과하여 intermediate volume으로 이동한다(과정 6-3).

작동유체를 이상기체라 하고 모든 과정을 이상상태라고 하면

고온 열원으로 부터 흡수한 열

$$Q_h = m_h T_h (s_2 - s_1) = m_h RT_h \ln (v_2/v_1)$$

저온 열원으로 부터 흡수한 열

$$Q_c = m_c T_c (s_6 - s_5) = m_c RT_c \ln (v_6/v_5)$$

intermediate Volume에서 방출된 열

$$Q_a = (m_h + m_c) T_a (s_4 - s_3) = - (m_h + m_c) RT_a \ln (v_3/v_4)$$

시스템에서의 정미 열전달은 0이므로

$$Q_h + Q_c + Q_a = 0$$

따라서 $m_h RT_h \ln (v_2/v_1) + m_c RT_c \ln (v_2/v_1) - (m_h + m_c) RT_a \ln (v_2/v_1) = 0$

또는 $m_c/m_h = (T_h - T_a)/(T_a - T_c)$

따라서 이상적인 VM 냉동기의 성적계수는 $COP = Q_c/Q_h = m_c T_c/m_h T_h = T_c (T_h - T_a)/T_h (T_a - T_c)$ 가 된다.

3.5. 기 타

위에서 언급한 냉동기들은 재생기(regenerator)를 열교환기로 사용하는 소형 극저온 냉동기들이고 이러한 타입으로는 단지 한 moving part만을 갖는 냉동기인 pulse tube 냉동기가 현재 상업화는 되어 있지 않지만 많이 연구되고 있으며, 대형 극저온 냉동기로서는 주로 recuperative 타입 열교환기를 사용하는 Joule-Thomson 냉동기, Brayton 냉동기 등이 있다. 또한 1K 이하의 온도를 발생시킬 수 있는 He³-He⁴ 희석 냉동기와 단열소자법을 이용한 자기 냉동기 등도 있다.

4. 국내외 극저온 냉동기술 개발현황

일부 선진국에서는 60년대 말부터 일부 군사용과 우주항공용으로 극저온 기술이 개발되기 시작하여 2절에서 언급한 바와 같은 모든 분야에서 극저온 기술이 응용되고 있으며, 현재는 이러한 극저온 기술의 효율을 높이는 방법과 극저온 냉동기의 life-time을 늘리는 연구를 수행하고 있다. 또한 극저온 연구에서 필수적인 액체헬륨을 생산하기 위하여 필요한 헬륨액화장치(helium liquifier)가 현재는 대형이고 효율이 낮기 때문에 이를 극복하기 위하여 일본 등지에서 소형 극저온 냉동기를 이용하여 소량의 액체헬륨을 생산하기 위한 냉동기의 개발에 관한 연구를 수행하고 있다. 이 연구에서는 재생기로 사용하는 물질을 기존의 납(Pb)에서 헬륨액화온도 근방에서 큰 비열을 갖는 자성물체(GdRh, Er₃Ni 등)로 교체하여 소형 냉동기의 도달온도를 4.2K 이하로 낮추는 연구가 활발히 진행되고 있고 현재 3K 정도의 도달온도를

달성하였다. 이와 같은 연구 이외에도 3절에서 언급했던 pulse tube 냉동기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 기존의 소형 극저온 냉동기에 비하여 그 구조가 지극히 간단하고, 소형 냉동기에서 가장 문제가 되고 있는 압축기를 기계식 압축기가 아닌 수소를 흡수·방출할 때 열을 방출·흡수하는 물체를 이용한 압축기로의 대체가 용이하기 때문이다. 이 냉동기로는 현재 실험실 레벨에서 30K 정도의 도달온도를 달성하였다.

선진국에서는 이러한 극저온 발생기술 뿐만 아니라 극저온 현상을 이용한 여러분야의 연구가 활발히 진행되고 있는데 이러한 연구로써는 전기저항이 0인 초전도체를 이용한 전기의 수송, MHD 발전, Josephson 소자개발, 고온초전도체의 개발, 핵융합 연구, SQUID, 극저온 복합재료 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

국내에서는 일부 대학과 연구소에서 액체헬륨의 열·유동특성 해석과 같은 기초연구와 현재 각광을 받고 있는 고온초전도체에 관한 연구가 진행되고 있으며, 극저온 발생기술에 관해서는 전무한 상태였으나 당 실에서 첨단기술 연구과제인 "Cryopump 설계 및 제작기술 개발" 연구과제에서 20K 정도의 도달온도를 갖는 2단 Gifford-McMahon 냉동기를 개발하는 연구를 수행하고 있는 실정이다.

5. 맺음말

현재 국내의 극저온 관련기술은 거의 고온 초전도체에 관한 연구에 한정되어 있는 실정이지만 위에서 언급하였듯이 구미 선진국과 일본, 중국 등지에서의 극저온에 관한 연구는 2-30년전 부터 시작되어 현재는 10°K 정도의 초극저온에서 부터 120K의 극저온까지의 넓은 응용분야에서 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 우리나라도 선진국 진입을 위한 필수기술의 하나로써 극저온 기술에 관한 연구에 많은 노력을 기울일 필요가 있다고 생각된다. 이를 위하여 국내의 대학, 연구소, 기업들의 공학도, 연구원, 기술자들이 극저온 기술에 많은 관심을 갖기를 바라며 정부에서도 이 분야에 대한 적극적인 지원을 해주기를 바라며 이 글을 마친다.

참고문헌

- [1] B. A. Hands, "Cryogenic Engineering," Academic Press, 1986.
- [2] G. Walker, "Cryocoolers," Plenum Press, 1983.
- [3] R. F. Barron, "Cryogenic Systems," Oxford Univ. Press, 1985.
- [4] 김영인, 장호명, "극저온 냉동기(1)," 공기조화·냉동공학 Vol. 18, No. 6, 1989.