

극저온 냉동기(1)

Cryogenic Refrigerators

김 영 인*, 장 호 명**
Y. I. Kim, H.M. Chang

1. 극저온 냉동기의 개요

1.1 서 론

극저온 냉동기술은 많은 사람들에게 항공우주 산업에 필요한 기술 또는 공기, 헬륨과 같은 기체를 액화하는 기술로 알려져 있다. 실제로 1960년대까지만 해도 극저온의 응용분야가 그리 넓지 않아서, 냉동기술은 냉동이 필요한 온도에 따라 질소(76K), 수소(20K), 헬륨(4K) 등을 액화하여 적절한 방법으로 이 액체를 수송, 저장하고 냉동이 필요한 부분에 주기적으로 공급하여 사용하는 기술을 의미하였다.

그러나 1970년대 이후 극저온 기술은 과학적 연구 영역에서 뿐 아니라, 의료분야, 진공관련분야, 에너지관련분야, 수송관련분야 등 여러 산업적 응용영역으로 실용화되었으며, 각각의 냉동 수요에 부합하는 다양한 냉동기가 개발되었다. 외형적 크기로 보면, 극저온 진공펌프(Cryopump)용 냉동기인 약 30~40cm의 소형부터 초전도 자석을 이용한 핵융합로(Fusion Reactor)의 냉동기인 수십m에 이르는 초대형에 이르기까지 그 종류가 대단히 많다. 또한 냉동온도에서도 천연가스의 액화 온도인 약 120K부터, He³를 이용한 희석식 냉동기의 10⁻⁶K 이하에 이르기까지 그 범위가 넓다.

극저온 기술은 이제 과거에 같이 일부 과학적 현상을 연구하기 위한 수단이나 선진 몇 개국에 한정되어 있는 우주 항공용 기술로써만 이해되서는 안될 것이다. 이미 상업적으로 국제적 경쟁이 시작된 극저온 진공펌프나 의료용 자기공명 영상기(MRI, Magnetic Resonance Imager) 등과 같이 기술 집약적인 산업에 꼭 필요한 하나의 요소기술로 이해되어야 할 것이다.

이런 관점에서 이 글은 극저온 냉동기술 전반에 걸쳐 개략적으로 소개함으로써 학계 및 산업계에 많은 관심을 불러 일으키고자 한다. 모두 5편으로 구성될 예정인데 제 1편인 본 원고에서는 냉동기의 응용분야, 저온생성원리, 냉동기의 분류 등 개요에 대해 기술하고 제 2편부터는 구체적인 냉동기들의 원리, 해석 및 설계방법, 개발현황 등에 대해 살펴보기로 한다. 기술적 또는 상업적 중요성에 비추어 제 2편에서는 Stirling 냉동기, 제 3편에서는 G-M(Gifford-McMahon) 냉동기, 제 4편에서는 대형냉동기에 대해 비교적 상세히 소개하고 제 5편에서는 나머지의 여러 냉동기들에 대해 간략히 다루고자 한다.

1.2 극저온 냉동기의 응용분야

극저온이란 대체로 120K 이하의 온도를 뜻하는 데 극저온의 영역에서는 모든 물질의 열

* 정회원, 생산기술연구원 연구개발본부

** 생산기술연구원 연구개발본부

적, 물리적, 기계적 성질이 그 이상의 온도에서와 다른 양상을 보이고, 특히 일부 물질들의 초전도(Superconductivity) 현상이 나타난다. 이 저온성질을 이용한 여러 산업영역과 과학기술적 연구영역에의 응용분야를 살펴보면 다음과 같다.

(1) 고진공 관련산업

약 10^{-7} Torr 이하를 말하는 고진공은 신소재개발과 고순도를 요하는 전자부품의 제작 과정에 필수적이며, 우주환경 실험에 이용되기도 한다. 고진공은 저온냉동을 통한 잔류기체(Residual Gas)의 제거로 가능하다. 극저온 진공펌프(Cryopump)는 잔류기체를 극저온으로 냉동되는 고체 표면에 응고, 흡착시킴으로써 진공을 생성하는 방법을 사용한다.

(2) 에너지 관련산업

극저온으로 냉동되는 초전도체를 이용하여 대단히 높은 전류밀도를 얻는 초전도 발전기와 Tokamak 용합로를 이용한 핵융합 발전기가 그 대표적인 응용사례이다. 또 극저온을 이용하여 효율적인 전력의 송전과 에너지저장을 할 수도 있으며, 최근 많은 관심을 갖게 된 수소에너지의 이용을 위해서도 극저온을 이용한 액화, 저장기술이 필요하다.

(3) 의료산업

혈액, 인체의 여러 조직(Tissue), 골수 등을 장기보존하기 위한 극저온 저장(Cryopreservation) 기술과 Parkinson 질병 등의 치료를 위한 극저온 수술(Cryosurgery)은 이미 알려져 있다. 그 밖에 1980년대에 들어 초전도를 이용한 저온기기로 가장 먼저 상업적 제품화가 된 자기공명 영상기(MRI)가 있다. 이는 핵자기 공명의 원리를 이용한 임상용 종합진단기로 1989년 현재 세계적으로 수천대가 보급된 것으로 알려져 있다. 또 초전도 양자 간섭장치(SQUID, Superconducting Quantum Interference Device)도 정밀한 자장의 측정을 통해 심전도, 뇌파 등을 측정하는데 사용된다.

(4) 수송 관련산업

시속 500km 이상의 자기부상열차(Magnetically Levitated Train)가 일본에서 개발되어 이미 수차례에 걸쳐 시험주행에 성공하였

고, 현재 실용화가 추진되고 있다. 이 열차도 극저온으로 냉각되는 초전도체를 이용하고 있다. 또 자기추진선박도 개발 중에 있다.

(5) 식품관련산업

식품 냉동의 한 방법으로 액체질소와 같은 한냉제(Cryogen)로 급속 냉각하여 저장, 운송하는 기술을 사용하는데 음식의 향과 맛을 보전하는데 그 효과가 크다.

(6) 우주항공산업

우주탐사용 우주선의 추진용으로 부피가 매우 작게 극저온으로 냉각된 액체산소와 액체수소가 이용된다.

(7) 통신관련산업

인공위성 등 원거리 통신을 위한 고주파 증폭기(Maser)의 감도는 증폭기 부품들의 극저온 냉각을 통해서만 크게 향상될 수 있다.

(8) 과학연구영역

물리학 연구를 위한 입자가속기(Accelerator)와 충돌기(Collider)는 길이 수 km에 이르는 대형으로 미주와 유럽 등지에 건설되었거나 현재 건설중에 있으며, 이들도 극저온 초전도체를 이용하고 있다. 기포상자(Bubble Chamber)나 초미량의 자기, 전압 등의 측정에 표준이 되는 초전도 양자 간섭장치(SQUID)도 극저온 냉동이 필요하다.

(9) 기타 분야

금속의 가공과정에서 극저온을 이용하여 재료의 강도를 대단히 향상시킬 수 있으며, 타이어 등 고무제품의 재생(Recycling)을 위하여 저온처리후 파쇄하는 방법이 사용된다.

1.3 극저온의 생성원리

극저온을 생성하는 방법은 열역학적 원리상, 등엔트로피 과정과 등엔탈피과정으로 나누어진다. 등 엔트로피과정*은 외부와 열교환을 하지 않는 단열과정이며 외부에 일(External Work)을 하면서 더 낮은 온도를 얻거나 냉동효과를 얻는 방법이다. 가장 대표적인 등엔트로피 과정은 압축성 유체의 단열팽창이다.

* 여기서는 열역학적 극한을 의미한다. 실제 시스템에서는 단열과정을 거치더라도 비가역성에 의해 엔트로피가 생성된다.

고압의 냉매가스를 냉각한 후 단열팽창하면서 외부에 일을 하면 냉매의 온도는 더 낮아지고 액화되기도 한다.

압축성 유체 대신 상자성염(Paramagnetic Salt)을 이용한 등엔트로피 과정이 자기냉동의 원리이다. 자장속에서 자화(Magnetization)된 염을 냉각한 후 단열 소자(Adiabatic Demagnetization)하면 더 낮은 온도를 얻을 수 있다. 이 방법은 1K 이하의 냉동에 쓰이고 있다.

등엔탈피 과정은 위의 등엔트로피 과정과 달리 외부에 일을 하지 않고 고압의 가스를 팽창시키는 방법이다. 그림 1.1과 같이 고압의 가스가 통로가 매우 작은 곳(밸브, Orifice, Porous Plug 등)을 지나면서 온도 강하가 생긴다. 이 현상은 J-T(Joule-Thomson) 효과라 불리는데 내부일(Internal Work)의 가스를 냉각하는데 사용되는 것으로 가스가 팽창할 때 분자들을 격리시키기 때문인 것으로 알려졌다.

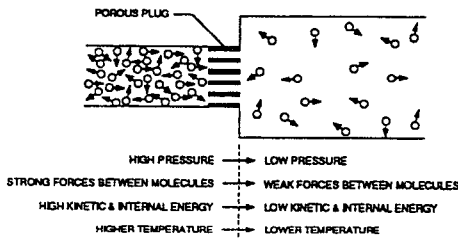


그림 1.1 J-T 효과의 원리

등엔트로피 과정에서 압력강하에 따른 온도 변화율을 JT계수(μ_{JT})로 표시한다.

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \dots\dots\dots (1.1)$$

임계점(Critical Point)에 비해 대체로 낮은 압력 또는 높은 온도에서는 냉매가 이상기체(Ideal Gas)와 같은 행태를 하므로 JT 계수는 거의 영이므로 냉동효과가 없다. 대체로 높은 압력에서는 JT계수가 보통 \ominus 이기 때문에 일반적으로 냉동효과를 얻을 수 없고 낮은 온도, 낮은 압력에서만 \oplus 이므로 냉동효과를 얻을 수 있다. 그림 1.2는 JT계수가 영인 역전곡선(Inversion Curve)을 보여주고 있으며,

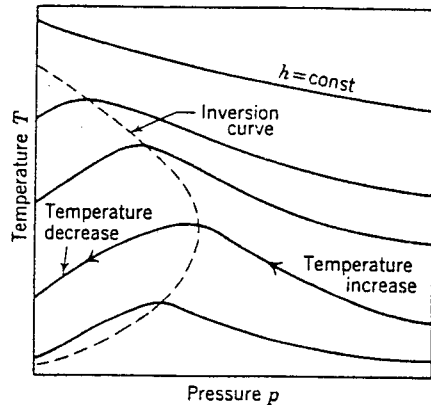


그림 1.2 역전 곡선

그림 1.3은 헬륨의 T-S 선도상에 등엔탈피 곡선을 보여주고 있다.

등엔트로피 과정과 등엔탈피 과정은 T-S 선도에서 그림 1.4와 같이 도식적으로 나타낼 수 있다. 열역학적으로 등엔트로피 과정은 가역(Reversible) 과정이나 등엔탈피 과정은 본질적으로 비가역성(Irreversibility)을 수반하므로 매우 손실이 많다. 그리고 등엔탈피 과정은 냉동효과를 위해 JT계수가 \oplus 인 낮은 온도까지 예냉(Precooling)을 해야만 하는 어려움이 있으나 등엔트로피 과정은 예냉을 필요로 하지 않는다. 반면에, 외부에 일을 하기 위해 등엔트로피 과정에서는 저온에서 작동하는 팽창엔진(Expansion Engine)이 필요하므로 소형냉동기에 부적합하다.

1.4 극저온 냉동기의 종류

1.4.1 분류

그림 1.5는 중요한 극저온 냉동기의 작동원리의 분류를 보여주고 있다. 1K 이상의 냉동에 쓰이는 냉동기는 크게 열교환기(Recuperative Heat Exchanger)형과 열재생기(Thermal Regenerator)로 나누어진다. 일반 열교환기는 두개나 그 이상의 열유동 매체가 서로 다른 통로를 이동하며 열을 교환하지만 열재생기는 하나의 통로를 시간간격을 두고 고온과 저온의 유체가 교대로 흐르며 재생기 재료에 열을 흡수, 방출하여 열을 교환한다.

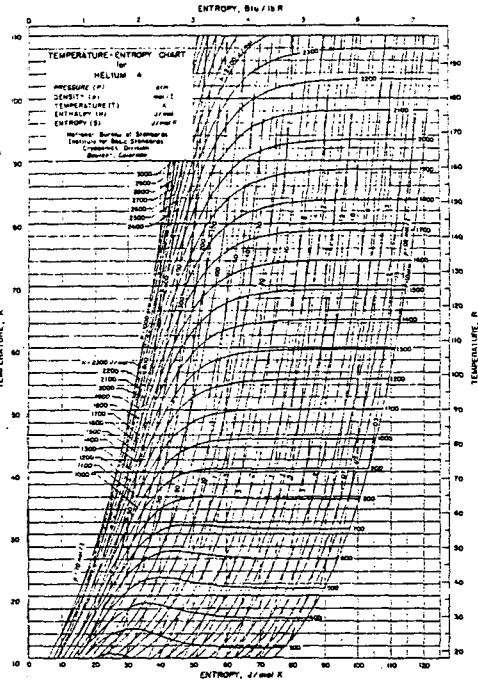
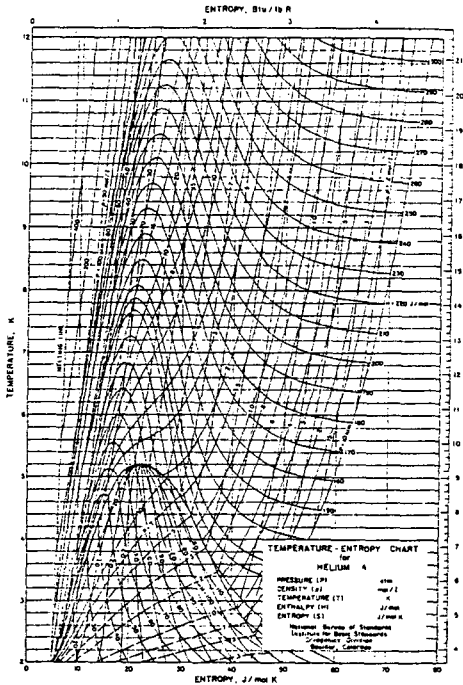


그림 1.3 헬륨의 T-S선도상의 등엔탈피 곡선

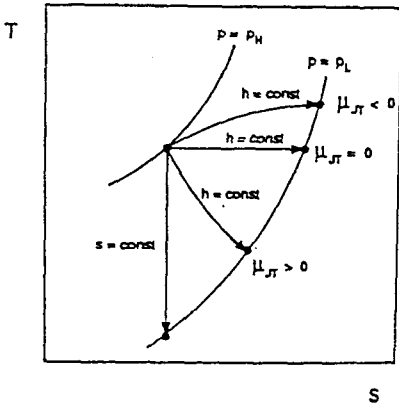


그림 1.4 등엔트로피 과정(S=const)과 등엔탈피 과정(h=const)

열재생기는 일반 열교환기에 비해 ①단위부피당 열전달 면적이 넓어 효율이 대단히 높고, ②제작이 용이하며, ③한 공간을 유체가 왕복하므로 불순물(Contaminant)의 응축(Condensation)을 줄일 수 있는 장점이 있다. 반면에 단점으로는 ①고체인 재생기 재료의 열용량이 20K 이하에서는 급격히 감소하므로 재생효과가 낮아지고, ②유체의 압력강하가 많다는 점이다.

대체로 보아 열재생기형 냉동기는 소용량이며 10K 이상의 냉동에 쓰여지고 열교환기형 냉동기는 대용량이거나 10K 이하의 온도에 많이 쓰이고 있다.

1.4.2 Stirling 및 VM 냉동기

Stirling 냉동기는 1817년 R. Stirling이 발명한 Stirling 엔진의 원리를 이용한 열재생사이클로 1950년대에 이르러 극저온 냉동용으로 상용화 되었다. Stirling 냉동기는 열역학적 효율이 극저온 냉동기중 가장 높고 제작이 대체로 용이하며 체적이 작으므로 소용량에서 대용량까지 널리 사용되고 있다. 그러나 작동현상이 복잡하여 해석과 설계가 어려우며 10K 이하의 냉동에는 사용할 수 없다.

작동원리는 그림 1.6에 보여준 바와 같이 두개의 등온 과정과 두개의 등적과정으로 설명된다. 재생기 내부의 빈 간극체적(Void Volume)을 무시하였을 때 모든 작동 유체는 1-2 과정 동안 재생기의 고온부(Warm End)에 있는 압축기(Compressor)를 통해 등온압축되며, 2-3과정 동안 재생기를 통해 냉각되며 저온부(Cold End)의 팽창기(Expander)로

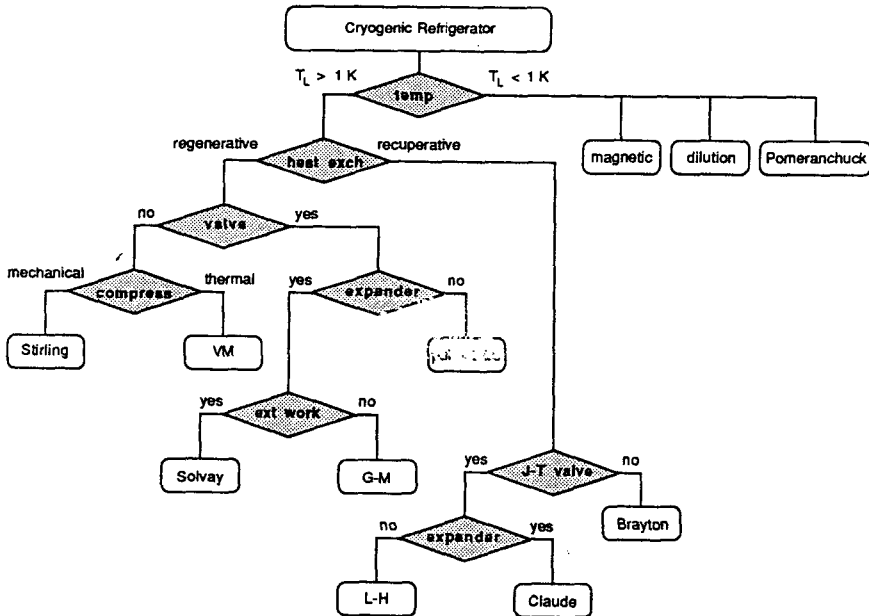


그림 1.5 중요 극저온 냉동기의 분류

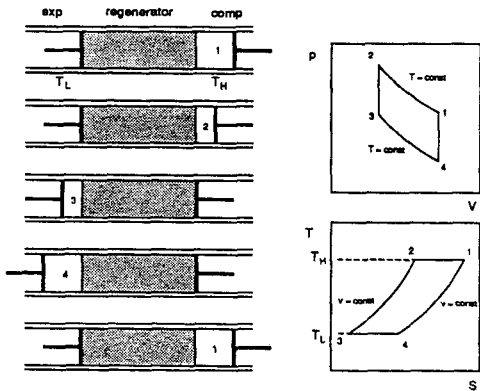


그림 1.6 Stirling 냉동기

등적 이동된다. 3-4 과정에서 저온의 유체가 외부에 일을 하며 등온 팽창을 통해 냉동효과를 얻고 4-1 과정에서 재생기를 통해 등적이 열된다. 이때 2-3 과정에서 재생기에 축열되는 양은 4-1 과정에서 방열되는 양과 같고 두 등온과정을 통해 외부와 열전달이 이루어지므로 Stirling 냉동기는 이상적인 Carnot 냉동효율을 갖게 된다.

실용적인 Stirling 냉동기는 위와 같은 이상적인 운전을 하지 못하나, 열재생기의 열효율이 대단히 높고 저온부에서 외부에 일을 하

며 생각을 하므로 냉동효율은 다른 냉동기에 비해 월등히 높다.

Stirling 냉동기는 압축기와 팽창기의 위치를 역으로 하면 Stirling 엔진이 되는데 외부에 열원이 있을 때에 엔진을 냉동기에 부착하여 냉동기의 압축구동용으로 한 것이 VM (Vuillemier) 냉동기이다. VM 냉동기는 태양열이나 추진계의 폐열을 이용하는 우주항공용 냉동기로 사용되고 있다.

1.4.3 Solvay 및 G-M 냉동기

Stirling 냉동기의 압축부분을 밸브를 통하여 분리 운전하는 것이 1887년 Solvay의 발상이었으나 1950년대에 이르러서야 극저온 냉동에 실용화되었다. 그림 1.7이 보여주는 것같이 Solvay 냉동기는 고압흡입용과 저압배기용 밸브 두개로 압축기를 열재생기 및 팽창기와 분리시켰다.

이 분리는 압축기의 기하학적 분리라는 점 이외에, 압축구동의 선택은 폭을 넓혔다는 점에서 대단히 그 의미가 크다. Stirling 냉동기에서는 압축기와 팽창기가 하나의 조합으로 작동하므로 구동장치의 운전속도, 용량의 선택이 다양하지 못했으나, Solvay 냉동기에서

는 적당한 밸브의 조작으로 대량 생산되는 많은 공조용 혹은 냉동냉장용 압축장치로 대치 가능해졌다. 그 결과 설계의 다양성은 물론 경제적으로 냉동기 단가가 많이 절감되었다.

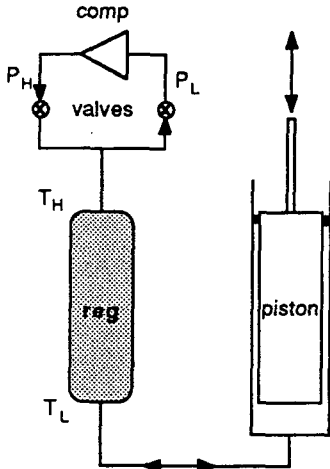


그림 1.7 Solvay 냉동기

Solvay 냉동기에 간단하지만 대단히 중요한 수정이 1959년 W. Gifford와 H. McMahon에 의하여 제시되었다. 이는 그림 1.8에서 보여주듯이 열재생기의 고온부와 팽창기의 상단 공간을 연결함으로써 팽창피스톤을 양단의 입력차가 거의 없는 왕복기(Displacer)로 바꾼 G-M(Gifford-McMahon) 냉동기이다.

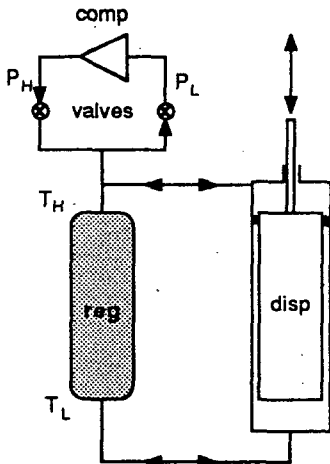


그림 1.8 G-M 냉동기

G-M 냉동기의 작동순서는 다음과 같다. 왕복기가 하단에 위치한 상태에서 고압흡입밸브가 열리면 고압냉매는 왕복기의 상단공간에 채워지고, 왕복기가 상향운동을 하면 고압냉매는 재생기를 통해 냉각되며 왕복기의 하단공간으로 이동한다. 이 동안 계속해서 열려있는 고압흡입밸브를 통해 냉매의 냉각에 의한 부피 축소량만큼 더 흡입된다. 고압상태에서 왕복기가 상단에 도달하면 흡입밸브는 닫히고 저압배기밸브가 열린다. 이때 왕복기 하단공간의 저온고압냉매는 팽창하며 냉동효과를 얻고 왕복기의 하향운동으로 재생기를 통해 가열되며 배기된다.

G-M 냉동기의 왕복기는 전싸이클에 걸쳐 양단의 압력차가 열재생기를 통한 냉매의 압력강하 양만큼 매우 작으므로 그 운동장치가 크게 간략해지는 장점이 있다. 반면, 저온의 고압냉매가 외부에 일을 거의 하지 않고 밸브와 재생기에서의 손실로 소모되므로 열역학적 효율은 낮다. 이 두 가지 점은 서로가 Trade-Off로 생각되는데, 현대의 많은 응용분야에서는 냉동기의 효율보다는 신뢰도(Reliability)가 더욱 중요한 이유로, G-M 냉동기는 20K와 80K 사이의 소형냉동기의 거의 전부를 차지하고 있다.

1.4.4 맥동관 냉동기

열재생기를 사용한 냉동기로 팽창부의 운동장치(Moving Part)가 전혀 없는 것이 맥동관(Pulse Tube) 냉동기이다. 1965년 W. Gifford와 R. Longworth에 의해 고안되어 약 60K 이상의 극소용량의 냉동에 사용되며 현재까지 연구개발중에 있다.

그림 1.9와 같이 열재생기를 통해 저온으로 냉각된 냉매는, 상단이 상온으로 유지되는 밀폐공간(맥동관)에 압축되면서 온도가 상승한다. 이때 상단의 열교환기를 통해 외부로 열전달이 이루어진다. 그 후 압력이 강해지면 냉매는 압축시보다 더 낮은 온도로 재생기 쪽으로 팽창하며 이를 냉동에 이용한다.

맥동관 냉동기는 일체의 운동장치가 없으므로 신뢰성면에서는 가장 우수하나 실용화를 위해서는 개선의 여지가 많다.

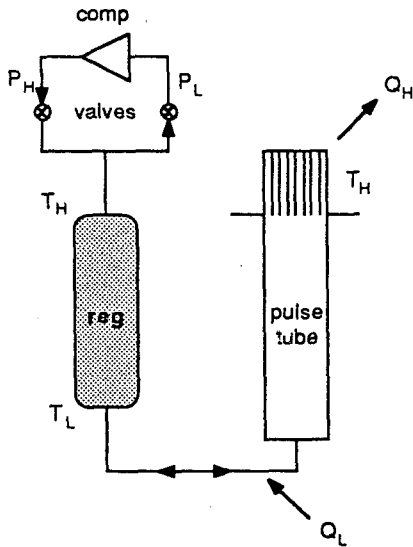


그림 1.9 맥동관 냉동기

1.4.5 Linde-Hampson(J-T), Claude 및 Brayton 냉동기

위에서 언급한 열재생기형 냉동기들은 20K 이하에서 재생기의 성능이 급격히 떨어지므로 더 낮은 온도의 냉동기는 반드시 반류형(Co-counterflow) 열교환기를 사용해야만 한다.

가장 간단한 열교환기형 냉동기는 Linde-Hampson 냉동기 또는 J-T 냉동기로 그림 1.10에 보여진 구조를 갖는다. 고온 압축부와 저온 팽창 및 냉각부 사이에 효율이 높은 반류형 열교환기를 두어 고압냉매가 J-T 밸브를 통과하기전에 충분히 냉각시키는 방법이다. Linde-Hampson 냉동기에 관하여 두가지 매우 중요한 점이 있다.

첫째, J-T 밸브는 등엔탈피 과정을 거치므로 최대역전온도(Maximum Inversion Temperature)가 상온보다 낮은 수소나 헬륨을 냉매로 이용하기 위해서는 반드시 예냉(Pre-cooling)이 필요하다는 점이다. 예냉없이 상온에서 운전을 시작하였을 때 냉동기는 극저온에 도달할 수 없다.

둘째, 열교환기의 열역학적 성능에 관한 점이다. 정상상태에서 고압과 저압 두 유체의 유동량이 같더라도 고압유체의 비열이 저압측보다 크기 때문에 열역학적으로 우수한 평형반

류(Balanced Counterflow) 열교환을 하지 못한다. 특히 고압의 냉매가 임계점(Critical Point) 근처를 지날 때는 비열이 대단히 큰 값을 갖는다. 그림 1.10에서 저압측의 유체가 상태 1에서 상태 2로 온도가 증가해도 고압측에서는 상태 3에서 상태 1의 온도보다 훨씬 높은 상태 4에 도달하게 된다. 다시 말해서 열교환기에서의 온도차가 고온부에 비해 저온부에서 매우 크게 되므로 열역학적 비가역성이 대단히 크게 되는 것이다.

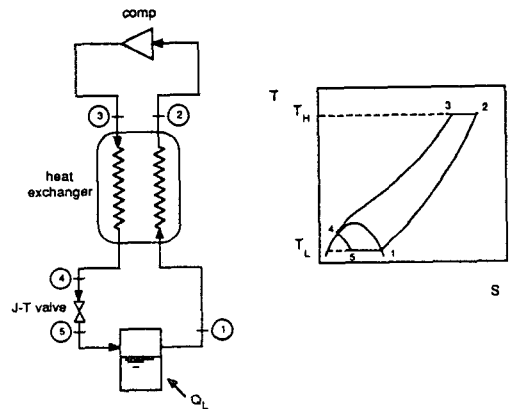


그림 1.10. Linde-Hampson(J-T) 냉동기

이 두 가지 문제를 잘 해결한 방법이 그림 1.11에 보여진 Claude 냉동기이다. 열교환기의 중간부분(상태 6)의 고압유체의 일부를 팽창엔진을 통해 외부로 일을 하게하여 냉각시킨 후 저압유체측(상태 2)에 공급하게 되어 있다. 이 장치로 열교환기의 저온부에서 온도차를 줄여 냉동기 전체의 효율을 높이는 한편 예냉없이 냉동기를 운전할 수 있게 되었다. Claude 냉동기의 원리는 대형 냉동기에 많이 이용되고 있다.

또 다른 방법은 습식 팽창기(Wet Expander)를 이용한 Brayton 냉동기이다. 그림 1.12와 같이 Linde-Hampson 냉동기의 J-T 밸브를, 비교적 저속 운전하는 팽창엔진으로 대체하여 밸브에서의 손실을 줄임으로써 냉동기의 성능을 크게 향상시킨다. 습식 팽창기는 팽창 과정에서 냉매가 액화되는 특수한 팽창기인데 기체와 액체간의 밀도차가 크지 않은 헬륨의

경우 설계와 제작이 비교적 용이하고 성능이 우수한 것으로 알려져 있다.

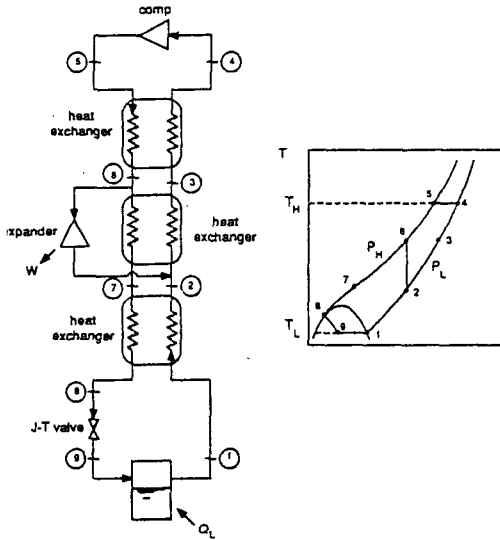


그림 1.11 Claude 냉동기

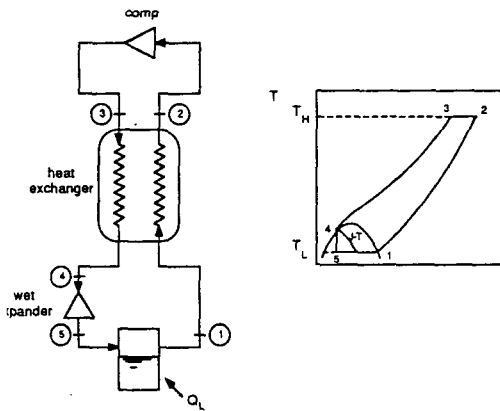


그림 1.12 Brayton 냉동기

1.4.6 Cascade, 다단식 및 복합식 냉동기
 실용적인 냉동기의 이용사례를 보면, 위에서 소개한 냉동기를 여러가지 방법으로 응용한 예를 볼 수 있다. Cascade 냉동은 작동온도가 다른 냉매들을 각각 사용하는 여러 냉동기를 하나의 조합으로 사용하는 방식이다. 예를 들면, 액체 헬륨 온도(4K)를 위한 Linde-Hampson 냉동기의 열교환기 상단을 액체 수소 온도(20K)의 다른 Linde-Hampson 냉동기가 냉각하고, 이는 액체 질소 온도(76K)의 냉동기가 냉각하는 방식이다.

다단식(Multi-Stage) 냉동기는 Stirling과 G-M 냉동기에서 중간온도에서 작동하는 팽창기를 1개(2단식) 또는 2개(3단식)을 두어 팽창된 냉매를 일부는 다시 그 상단부의 열재생기로 돌려 보내고 나머지 일부만 하단부의 냉동에 사용하는 방식이다. 이 방식은 Claude 냉동기에도 적용되어 중간 팽창엔진을 하나 더 부착하여 4K 냉동기를 최적화하였는데, 이것이 소위 Collins의 헬륨액화냉동기이다. Collin 냉동기는 1946년에 개발되어 액체 헬륨의 대량생산을 가능케 하였으며 새로운 저온공학의 시대를 열 수 있게 하였다. 혹자는 이 1946년 이전을 저온공학의 B. C. (Before Collins)라고 부르기도 한다.

또 여러 냉동기 중 두 가지 이상을 복합적으로 사용한 냉동기들도 있다. 4K의 소형 냉동용으로 가장 많이 이용되는 GM-JT 냉동기가 그 대표적인 예이다. 80K와 20K의 2단식 G-M 냉동기를 J-T(또는 Linde-Hampson) 냉동기의 중간 냉각장치로 이용하는 방법이다.