

헬륨액화와 저온 냉동기술의 발전

장 호 명

홍익대학교 기계시스템디자인공학과

1. 서 론

올해는 Kamerlingh Onnes가 네덜란드에서 헬륨을 처음 액화하는데 성공한 지 꼭 100년이 되는 해이다. Linden의 실험실에서 시작된 액체 헬륨의 역사는 절대온도 4 K에서의 냉동기술의 시초가 되기는 하였으나, 실제로 액체헬륨을 이용한 냉동기술이 현실적으로 응용되기까지는 무려 40년에 가까운 시간이 소요되었다. 이후 액체헬륨 온도(4 K)에서의 냉동기술은 10 kW급의 대용량 냉동에서 1 W급 소용량 냉동까지 다양한 기술로 진보를 계속하게 된다. 이런 액체헬륨 냉동기술은 우주개발이나 고에너지 물리연구를 통한 현대과학의 발전에 결정적인 기여를 했다. 또 의료용 MRI기기와 같이 초전도체의 실용화를 가져오는데에도 큰 역할을 담당했다. 이 글에서는 초기 헬륨액화에 성공한 고전적인 냉동기술에서 시작하여 현재까지 진보되고 있는 대표적인 냉동 및 관련기술들을 간략히 살펴본다.

2. JT팽창 및 캐스케이드 냉동

1908년의 헬륨 액화기술은 고압기체가 좁은 유동통로를 지나면서 압력과 온도가 강하하는 JT팽창(Joule-Thomson expansion) 과정을 기반으로 하였다. 이 과정은 모세관, 밸브, 오리피스 등과 같이 매우 간단한 장치로 발생이 가능하다. 그러나 JT팽창 과정은 기본적으로 상당한 엔트로피가 생성되는 되는 비가역과정으로 냉동효율이 매우 낮다. 일반적으로 등엔탈피 과정으로 간주하는 이 과정에서 압력변화에 따른 온도변화율을 JT계수라 부르고, 편미분 관계식과 Maxwell 관계식을 이용하면

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h = \frac{1}{C_p} \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P - v \right]$$

(T : 온도, P : 압력, h : 비엔탈피, C_p : 정압비열,

v : 비체적)로 나타낼 수 있다. 유체가 이상기체의 거동을 할 때에는 $Pv = RT$ 의 관계가 성립되므로 팽창에 의한 온도강하가 없어 JT계수가 0이 된다. 그러나 상대적으로 온도가 낮고 압력이 높아서 분자간의 인력에 의한 분자 위치에너지(molecular potential energy)가 중요한 상태에서 JT계수가 양수가 되어 팽창에 의한 온도강하를 얻을 수 있다. 반면에 압력이 지나치게 높으면 분자간의 거리가 너무 가까워서 서로 밀치는 척력이 작용하는 상태가 되고, 이 때 JT계수는 음수가 되기도 한다. 이 사이에 JT계수가 0이 되는 곡선을 역전곡선(inversion curve)라 부른다. 등엔탈피 팽창을 이용하여 냉동이나 액화를 수행하기 위해서는 기체가 JT계수가 양수가 되는 역전곡선 내에서 팽창되어야 한다.

헬륨의 역전곡선은 모두 40 K 이하의 극저온에서만 존재하므로, 헬륨을 액화하거나 액체헬륨 온도에서 JT팽창 과정을 이용한 냉동을 수행하기 위해서는 반드시 이 영역까지 예냉(precooling)이 필요하다. 처음 헬륨을 액화하던 100년 전의 기술은 그림1과 같이 JT팽창을 다단계로 이용하는 소위 캐스케이드(cascade) 냉동이었다. 액체 암모니아(약 240 K)를 이용하는 일반 증기압축 냉동사이클이 질소 JT사이클을 예냉하고, 액체 질소(약 77 K)가 수소 JT사이클을 예냉하고, 액체 수소(약 20 K)가 헬륨 JT 사이클을 차례로 예냉하는 구성이다.

1908년에 네덜란드에서 캐스케이드 냉동으로 헬륨을 액화하는데 성공한 후, 이 기술이 다른 곳에서 재현되는 데에는 15년 이상의 시간이 더 필요하였다고 기록되어 있다. 그 이유는 여러 단계의 냉동사이클을 효율적으로 예냉하는 기술, 각 단의 냉매를 필요한 압력까지 압축하는 기술, 저온부를 효과적으로 단열하는 기술 등이 쉽지 않았기 때문이다. 그러나 그 중에서도 가장 어려운 기술은 액체수소를 이용한 예냉기술이었다. 수소는 반응성

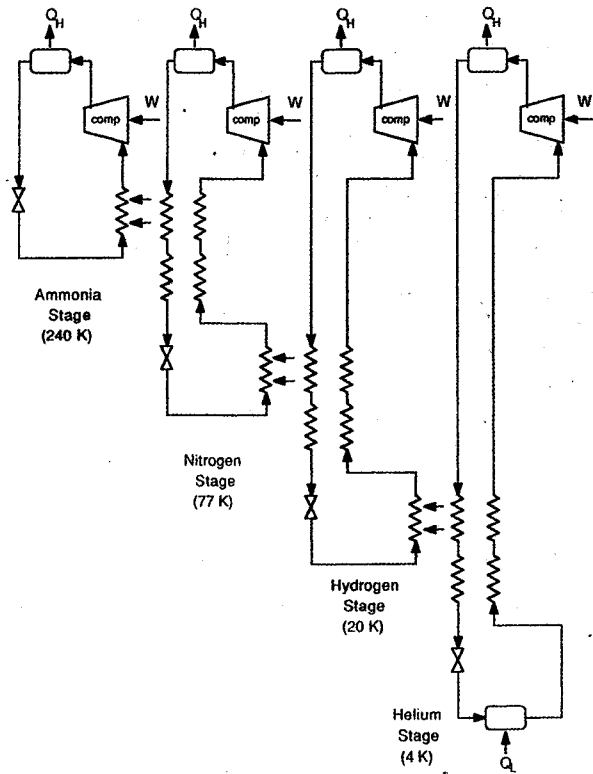


그림 1. 액체헬륨용 캐스케이드 냉동기의 구성. (20세기초 헬륨 액화용)

이 크고 다루기 어려우며, 분자가 액화하기 어려운 구조(ortho-para)를 갖고 있다. 따라서 액체수소의 도움 없이 액체헬륨 냉동을 실현하는 것이 20세기 전반의 기술진보에 핵심이 되었다고 할 수 있다.

3. 극저온 팽창기 및 Collins 냉동

JT팽창 과정을 기본으로 하는 액체헬륨의 냉동기술은 열역학적 구성상, 그 효율이 지극히 낮을 수밖에 없고, 액체수소의 예냉이 반드시 필요하기 때문에 그 실용성에 한계가 있다. 이 한계를 극복하기 위한 노력의 결실은 헬륨이 처음 액화된 지 약 40년이 지난 후에 미국 M.I.T. 기계공학과와 Samuel Collins교수에 의해 결실을 거두었는데, 극저온 팽창기(cryogenic expander)가 바로 그것이다. Collins는 두 개의 극저온 팽창기를 이용하여 액체헬륨용 냉동기의 개발에 성공하였는데, 이로 인해 일부 전문가들에게만 한정되었던 액체헬륨을 일반인들이나 산업계에

보급되는 단계에 이르게 되었다. 그리고 헬륨을 천연가스(natural gas)에서 분리하여 대량으로 유통하기 시작한 것도 이 시기라고 할 수 있다.

1946년에 개발에 성공한 이 팽창기의 구조는 그림 2와 같다. 크랭크 축에 의해 왕복운동을 하는 피스톤-실린더 조합에 밸브로 유체의 출입을 제어하는 구조를 갖는다. 개발 초기에 설계된 팽창기는 일반 팽창엔진과 유사한 구성을 하여, 피스톤 로드와 밸브 로드 가 압축력을 받기 때문에 기계적 강도를 위한 단면적이 극저온의 열유입에 원인이 되어 냉동에 성공하지 못하였다. 반면에 Collins의 팽창기는 피스톤 로드(piston rod)와 밸브 로드(valve rod)가 항상 인장력을 받도록 설계하여, 적은 단면적으로 제작하여 열유입을 크게 줄였고, 피스톤 외벽에 미카르타(micarta)라는 복합재료를 코팅하여 고체유탄의 방식으로 극저온 팽창기로 성공하게 되었다.

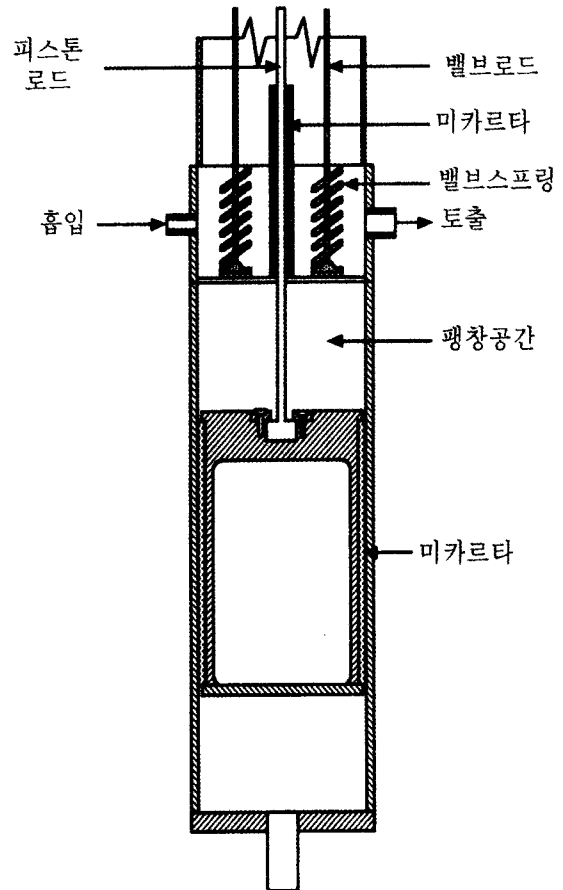


그림 2. Collins의 극저온 팽창기 구조. (미국 M.I.T. 1946년)

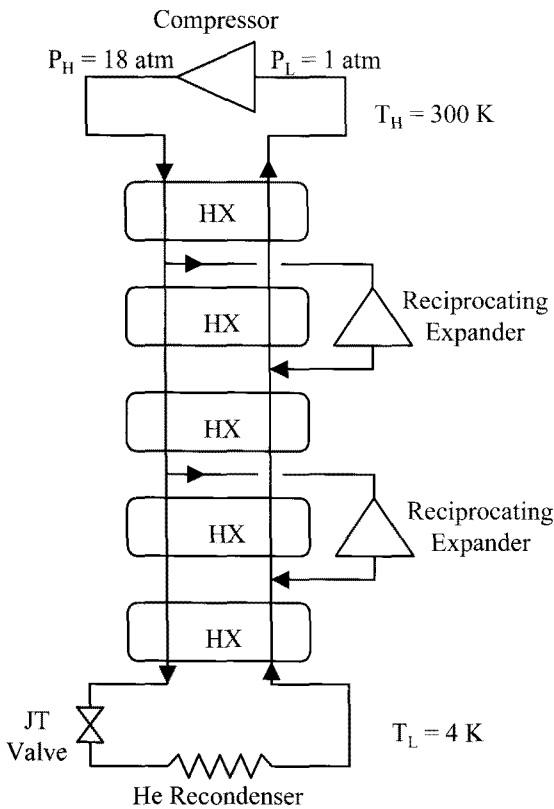


그림 3. 액체헬륨용 Collins냉동기의 구성.

Collins냉동기는 그림 3과 같이 상온의 압축기, 5개의 향류 열교환기(HX), 2개의 왕복동 팽창기, 그리고 하나의 JT밸브로 구성되었다. 5개의 향류 열교환기들의 크기와 두 팽창기로 추출되는 팽창 유량비들을 동시에 최적화 하여 효과적인 4 K의 냉동을 수행하게 된다.

이후 Arthur D. Little이라는 기업에서 액체용량 500 L/h급 액화기를 상업적으로 생산하면서, 많은 실험실에서 자체로 헬륨을 액화하여 4 K의 실험을 수행할 수 있는 저온공학(cryogenic engineering)의 시대가 활짝 열리게 되었다. 이런 열역학 사이클의 액체헬륨용 냉동기술과 동시에 액체헬륨의 고효율 저장 및 이송 기술의 발전으로 인해 액체헬륨의 사용자는 전세계로 확대되었다. 특히 냉동기가 밀폐사이클로 사용되면서 액체의 증발없이 장기간 정상상태를 유지하는 냉동기술로 발전하는 시발점이 되었다.

1950년대와 1960년대는 미국과 소련의 우주경쟁이 치열했던 시대였다. 미국의 아폴로 미션(U.S. Apollo Mission)으로 대표되는 유인

우주선 프로그램은 대량의 저온 추진제(액체수소와 액체산소)가 요구되었고, 여기에도 Collins사이클과 유사한 냉동-액화의 원리가 적용되었다. 또 액체헬륨은 추진시스템의 저온 고진공생성(cryopumping), 세정(purging), 누설검사(leak testing) 등에 사용되면서, 1968년의 연간 액체헬륨 사용량은 1950년보다 10배 이상 증가한 것으로 보고되었다. 이런 극저온 냉동의 수요를 충족하는 중심에 바로 Collins냉동기술이 있었음을 알 수 있다.

4. 고에너지 물리 및 대용량 냉동

1960년대 이후에는 고자장 생성을 위한 초전도 자석의 개발이 액체헬륨 냉동의 가장 큰 시장을 형성하게 된다. NbTi 및 Nb₃Sn 선재를 사용한 초전도 자석은 의료용 MRI의 소형에서 입자가속기나 핵융합 설비의 대형까지 다양한 냉동이 필요하게 된 것이다. 그중에서도 입자를 가속시키기 위한 고에너지 물리 설비가 가장 먼저 대용량 액체헬륨 냉동이 필요하게 되었다. 대표적인 예를 들면, 미국의 Argonn 및 스위스 CERN에 각각 설치된 3.7 m 및 4.7 m 크기의 기포실(bubble chamber) 초전도 자석이 있다. 현재까지 사용되는 기포실이 존재하지는 않지만, 대용량 액체헬륨 냉동시스템도 역시 Collins냉동기를 기초로 하고 있다.

1970년대에는 Fermi연구소의 고에너지용 입자 가속기와 CERN의 LHC(Large Hadron Collider)가 본격적으로 개발되기 시작되었다. 이 초전도 자석은 쌍극자(dipole) 또는 사중극자(quadrupole) 형태로 고리(ring) 모양을 하고 있으므로, 충분한 냉동용량이 요구될 뿐 아니라, 액체헬륨에 의한 냉동이 공간적으로 고르게 분배해야 하는 어려움이 있다. 게다가 최근에 와서는 여기에 더욱 중요한 요구사항이 추가되었는데, 바로 냉동 효율이 그것이다. 최신 LHC는 4 K에서 10 kW 이상의 냉동이 필요하게 되었는데, 기존의 표준 Collins냉동 사이클을 사용할 경우 소비전력이 무려 10 MW 이상에 이른다. 입자가속기를 운영하는 예산을 절감하기 위해서는, 대용량 냉동기 자체의 효율도 높여야 하고, 동시에 열부하(특히, 전류도입선 부하)를 줄이기 위한 다양한 노력이 동시에 경주되어 왔다.

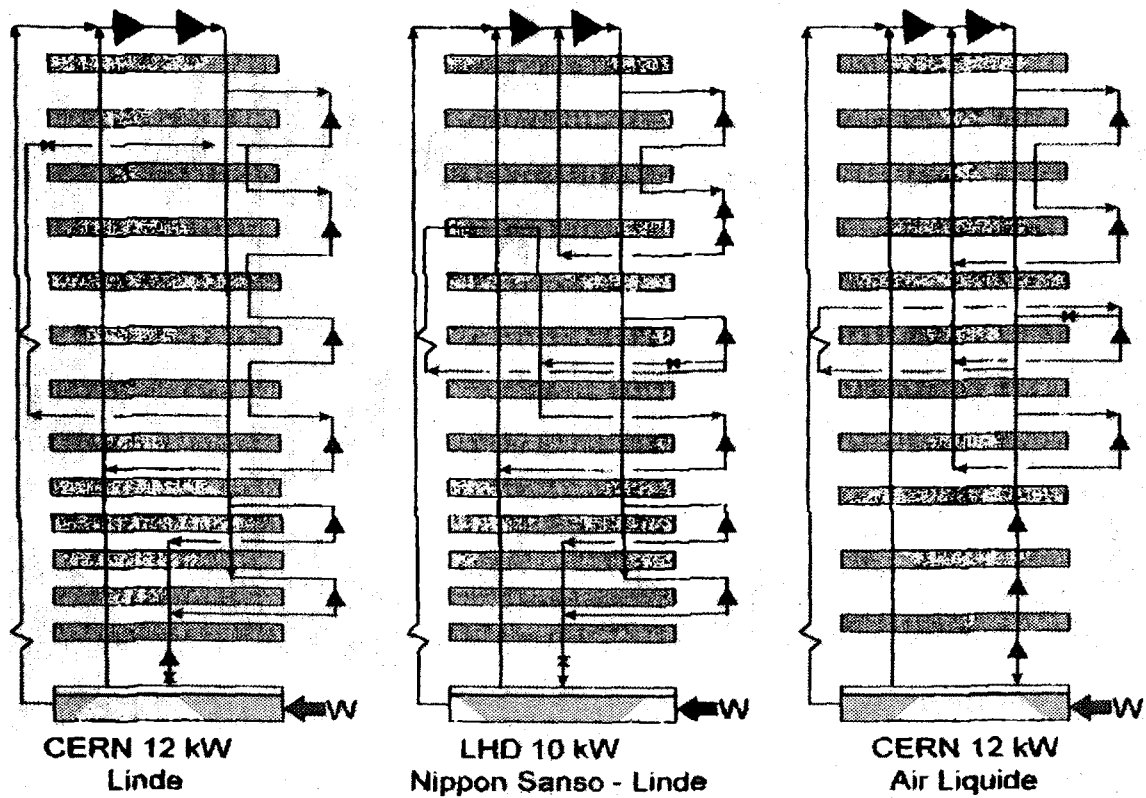


그림 4. Linde사(독일)와 Air Liquide사(프랑스)의 대용량 액체헬륨 냉동기.

그 결과로 1990년대 이후에 개발된 10 kW 이상급 대용량 액체헬륨 냉동기의 대표적인 구성은 그림 4와 같다. CERN, 일본의 LHD, 한국의 KSTAR 등에 적용되는 이 냉동기들은 주로 독일의 Linde사 또는 프랑스의 Air Liquide사에 의해 특별히 설계 및 제작되었고, 그 원리는 앞서 소개한 Collins냉동기와 다단 팽창기 등을 조합한 결과라고 할 수 있다. 실제로 이들 냉동기의 냉동효율(FOM 또는 %Carnot)은 표준 Collins냉동기의 3-4배까지 증가되고 있다.

입자가속기와 관련하여 최근에 연구개발이 진행중인 극저온 기술로 헬륨II를 이용한 2 K 근처의 냉동기술을 들 수 있다. 가장 대표적인 사례가 CERN의 LHC 냉동시스템, 미국 Thomas Jefferson연구소 CEBAF의 라디오파(RF) 공동(cavity) 가속기, 미국 Oak Ridge연구소에 건설 중인 파쇄 중성자원(spallation neutron source) 등이 있는데, 이들은 1.8-2 K 영역에서 수 kW의 냉동을 요구한다. 이 냉동은 액체헬륨 영역에서 작동하는 다단식 저온 압축기(cold compressor)

와 습식 팽창기(wet expander)를 이용하여 구현할 수 있다.

5. 액체헬륨 온도의 재생형 냉동

액체헬륨 온도의 냉동 중에서 1 W 또는 그 이하의 소용량 냉동이 필요한 분야가 최근에 많이 나타나고 있다. 가장 대표적인 예는 1980년대 후반부터 세계적으로 보급된 의료용 MRI용 초전도 자석을 들 수 있다. 또 최근 국내에서도 개발된 단결정 성장용 초전도 시스템에도 수 W 정도의 냉동을 필요로 한다. 1990년대 후반부터는 물리실험이나 재료의 특성 연구, 광석의 자기분리(magnetic separation)용 초전도 시스템 등의 분야에 액체헬륨 없이 밀폐사이클 냉동기가 직접 전도 냉각(conduction-cooled) 하는 초전도 시스템이 널리 사용되고 있다.

이러한 소용량 냉동은 열재생기(thermal regenerator)를 이용하는 재생형 냉동기가 사용된다. JT 또는 Collins냉동기의 향류 열교환기는 두 유체가 서로 다른 유동통로를 지

속적으로 흐르면서 열을 교환하지만, 열재생기는 하나의 유동공간을 유체가 왕복유동하면서 축열재에 열을 주기적으로 저장과 방출을 반복하면서 열을 교환하는 장치이다. 일반적으로 열교환형 냉동기는 대용량 냉동에 적합하며, 재생형 냉동기는 소용량 냉동에 적합하다.

현재 상업적으로 가용한 극저온 냉동기는 열역학 구성에 따라 Stirling 냉동기, GM (Gifford-McMahon) 냉동기, 맥동관 (pulse tube) 냉동기로 구분되며, 맥동관냉동기는 그 압축 방식에 따라 다시 Stirling형 맥동관 냉동기와 GM형 맥동관 냉동기로 세분할 수 있는데, 이들의 구성을 도식적으로 나타내면 그림 5와 같다.

Stirling 냉동기는 1950년대에 네덜란드 Philips사의 Kohler와 Jonker가 처음 개발하였고, 이론적으로 가역냉동기에 근접한 효율을 낼 수 있을 정도로 냉동효율이 가장 우수하다. 그림5와 같이 상온부에 압축기와 저온부의 팽창기가 위치하고 있으며, 두 피스톤이 약 90도의 위상차를 갖고 같은 주파수로 운전되는 구성을 한다. 동일한 주파수로 운

전되므로 압축기의 체적이 팽창기의 체적에 비해 매우 크며, 기본적으로 압축기 일체형이므로 극저온 시스템을 구성하는데 공간적인 어려움이 있다. 그리고 저온 팽창기가 고속으로 운전되므로, 운환-진동-소음에 어려움이 따르며 냉동기의 신뢰성과 내구성이 다른 냉동기에 비하여 약점이 있다.

1960년대에 미국의 Gifford와 McMahon에 의해 개발된 GM 냉동기는 압축기와 재생기 사이에 밸브가 있고, 재생기의 고온부와 팽창기의 고온부를 연결한 구성을 갖고 있다. 그림5와 같이 이 냉동기의 가장 큰 특징은 압축기를 고속(예: 2000-3000 rpm)으로 운전하면서, 변위기(팽창기) 왕복운동과 밸브의 개폐를 저속(예: 100-200 rpm)으로 하여, 압축부와 팽창부를 분리형으로 구성한 점이다. 이렇게 하면 압축 피스톤의 크기를 대폭 줄일 수 있을 뿐 아니라, 하나의 압축기를 생산하여 여러 가지 용량의 GM냉동기에 사용할 수 있고, 냉각용 coldhead의 공간적인 제약도 크게 줄일 수 있다. 또 저온 팽창기 피스톤에 작용하는 힘이 현저히 줄어들어 냉동기의 내구성과 신뢰성이 크게 증가하였다.

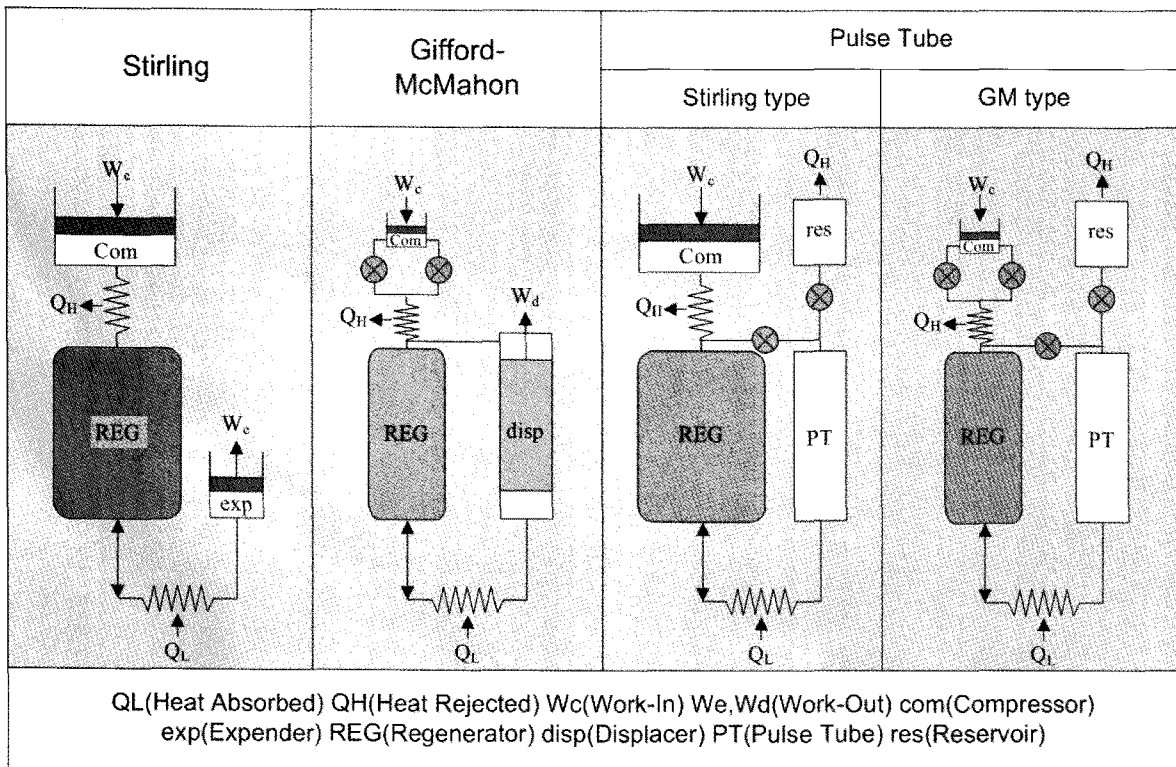


그림 5. 열재생형 냉동기(Stirling, GM, 맥동관 냉동기)의 도식적 구성.

반면에 밸브와 압축 냉매의 불구속 팽창으로 인한 엔트로피 생성이 증가하여, 소비동력이 Stirling 냉동기에 비하여 더 큰 단점이 있다.

맥동관 냉동기의 기본원리는 1960년대에 미국의 Gifford와 Longsworth에 의해 제안 되었으나, 1990년대부터 본격적으로 개발되었다. 이 냉동기는 그림5와 같이, Stirling 냉동기 또는 GM 냉동기의 팽창기(변위기)를 빈 공간(맥동관)으로 대체한 구성을 하고 있다. 이 공간은 축방향으로 온도구배를 가진 벽 내부에 유체가 왕복-압축 유동을 하면서 저온 벽에서 열을 받아 고온 벽으로 열을 방출하는 소위 표면 펌핑 (surface pumping) 현상을 이용한다. 압축기와 재생기 사이에 존재하는 밸브의 유무에 따라 Stirling형 맥동관 냉동기와 GM형 맥동관으로 구분한다. 일반적으로 GM형 맥동관이 더 낮은 온도의 운전에 장점이 있다. 맥동관 냉동기는 저온에서의 운동부가 전혀 없으므로, 신뢰성이 대단히 높고 연속운전 시간도 극저온 냉동기 중에서 가장 길며, 진동이나 소음도 가장 작다고 할 수 있다.

냉동사이클에 따라 약간의 차이가 있으나, 일반적으로 세 가지의 재생형 냉동기들이 도달할 수 있는 최저 온도는 1단으로 약 30 K 정도이고, 2단으로 냉동을 하더라도 약 10 K에 불과하므로 1990년대 초반까지도 액체헬륨 온도에는 도달할 없었다. 그 이유는 열재생기에 사용하는 축열재의 비열이 10 K이하에서 급격히 줄어들어 열재생 효과가 없어지기 때문이다. 대표적인 축열재인 납(Pb)의 저온 영역에서의 비열은 격자의 진동에너지에 의한 Debye 이론으로 잘 설명되며, 그림 6에 나타난 바와 같이 10 K이하에서 기체헬륨보다 체적비열이 더 작아진다.

1990년대 초 일본 동경공업대의 연구팀은 Er 또는 Ho와 같은 희토류(rare earth) 기반 물질 중에서 5-10 K의 비열이 대단히 큰 물질을 발견하게 되었다. 그림 6은 대표적인 열재생 물질의 체적비열-온도 관계를 납과 기체헬륨과 비교하여 나타내고 있다. 실제 냉동기에서 운전되는 헬륨의 압축압력이 약 2 MPa이므로, 8-10 K 영역에서 비열의 최대값을 갖는 물질들이 열재생 물질에 적절함을 알 수 있다. 이후 Sumitomo 중공업은 이런 물질을 재생기 하단에 충전함으로써 4 K에 도달하는 GM 냉동기를 개발하는데 성공

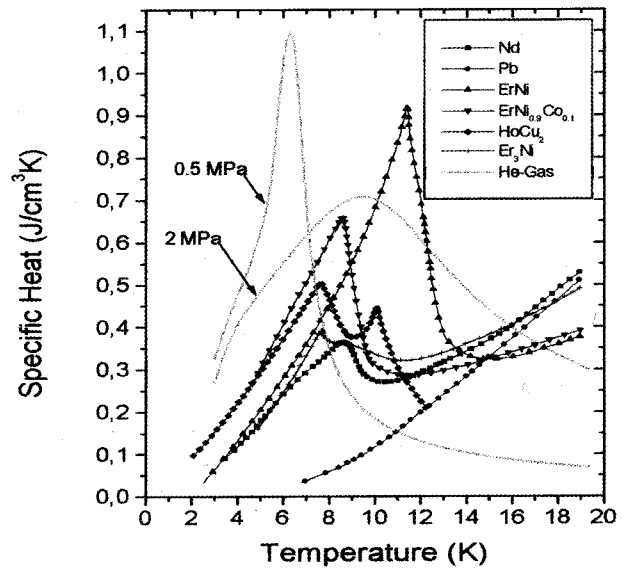


그림 6. 액체헬륨용 냉동기에 사용되는 희토류 열재생물질의 비열-온도 관계.

하였고, 현재 4 K 1.5 W급 2단식 GM냉동기를 판매하고 있다.

2000년 이후에는 GM형 맥동관 냉동기의 열재생기에도 동일한 희토류 물질을 적용하여 4 K의 냉동을 성공하였다. 현재 4 K 1 W 급 GM형 맥동관 냉동기가 다수의 제작사에 의해 상용화 되어 있다. 2004년에는 2 단형 맥동관 냉동기의 냉매인 헬륨(⁴He)을 동위원소인 ³He으로 대체하여 최저 1.27 K까지 도달했다는 기술보고도 있었다.

액체헬륨 온도의 2단식 재생형 냉동기의 개발은 액체 없이 저온 초전도 자석의 운전을 가능하게 하였다. 특히, 1990년대 고온 초전도체(HTS)의 개발과 함께 극저온용 전류도입선(current leads)에 의한 저온 열부하를 크게 줄이는 역할을 했다. 즉, 고온부에 금속도입선을, 저온부에 HTS 도입선을 직렬로 연결하여 사용하는 이중(binary) 전류도입선을 제작하고, 2단식 냉동기의 제1단(first stage)이 두 도체의 연결부를 냉각하고 제2단(second stage)이 HTS와 초전도 자석의 연결부(4 K)를 냉각하는 구성을 한다. 현재는 2단형 GM냉동기로 전도냉각되는 1 kA급의 HTS 전류도입선이 상용화되어 있다.

4 K 영역의 소용량 냉동은 앞으로도 계속 그 수요가 늘어날 것으로 예측되고 있다. 전도냉각형 초전도 자석이외에도, 전도냉각형 소형 SQUID(초전도 양자간섭 장치)와 같은

초전도 전자소자도 거의 실용화에 다가와 있다. 또 액체헬륨 용기에서 증발되는 헬륨을 재응축(recondensation)하여 액체의 보충 주기를 길게 하거나, 아예 장기 연속운전을 하는 ZBO(zero boil-off) 헬륨 시스템도 좋은 예가 될 것이다. 이 경우, 시스템 전체의 경제성은 냉동기에 의한 초기 투자비용과 일정기간의 운전비용에 의해 최적화가 필요하다.

6. 맺음말

저온공학에서 4 K는 대단히 중요한 온도이다. 인류가 100년 전에 헬륨을 액화하면서 처음으로 이 온도에 도달했던 역사적 사건은, 마치 선사시대에 인류가 처음으로 철을 녹인 사건에 비유할 수 있을 것 같다. 철기시대의 초기에는 철제품이 생존을 위한 무기에 불과했는지 모르나, 2-3천년 뒤에 인류가 산업화를 이루어 가는 중요한 첫 걸음이었음은 자명하다. 100년 전의 4 K는 짧은 시간 헬륨이 액체방울(liquid drop)로 존재했다가 곧바로 증발한 역사에 불과했다. 그러나 그 후 100년간 4 K의 온도를 통해 이룩한 과학적 진보는 (굳이 관련 노벨상의 갯수를 언급하지 않더라도) 무수히 많으며, 앞으로도 계속해서 진행될 것이다.

이런 진보의 배경에는 소용량 또는 대용량의 냉동기술의 발전이 기반이 되었다. 시작을 가능하게 했던 원시적인 캐스케이드 냉동, 엔지니어링을 통한 Collins 냉동, 물리학의 비약을 가능하게 하는 대용량 냉동, 실용화를 위한 소용량 냉동 등으로 요약할 수 있겠다. 헬륨 액화 100주년이라는 의미 있는 해에 4 K 냉동의 발전을 돌이켜 보는 일은 저온공학을 연구하는 한 사람으로 큰 보람이 아닐 수 없으며, 앞으로 관련 기술의 발전에 더욱 노력하겠다는 다짐과 함께 이 글을 마무리 하고자 한다.

참고문헌

- [1] R. Longworth, "100th Anniversary of the Discovery of Helium in Natural Gas," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.51A, pp.863-870, American Institute of Physics (2006).
- [2] H. Quack, "Helium Liquefaction and

Refrigeration since 100 Years," *International Cryogenic Engineering Conference 22 and International Cryogenic Materials Conference 2008*, Paper TU-P2, Seoul, Korea (2008).

- [3] T.M. Flynn, *Cryogenic Engineering*, 2nd ed., CRC Press, New York (2005).
- [4] S.W. Van Sciver, "Chapter 9 Advances in Helium Cryogenics," *Cryogenic Engineering Fifty Years of Progress*, ed. by Timmerhaus and Reed, Springer Science, New York (2007.)
- [5] S.C. Collins and R.L. Cannaday, *Expansion Machines for Low Temperature Processes*, Oxford University Press, London (1958).
- [6] J.L. Smith, Jr., "50 Years of Helium Liquefaction at the MIT Cryogenic Engineering Laboratory," *Advances in Cryogenic Engineering* Vol.47A, pp.213-224, American Institute of Physics (2002).
- [7] G. Walker, *Cryocoolers, Part 1: Fundamentals*, Plenum Press, New York (1983).
- [8] 김영인, 장호명, "극저온 냉동기(IV)," *공기조화·냉동공학*, 제20권, 제1호, pp.60-74, 대한설비공학회 (1991).
- [9] 장호명, "저온공학의 기초와 응용," 제6 장대형 저온 냉동 시스템, KAIST 산학연공 개강과 강연집 (2005).
- [10] 장호명, "극저온 냉동기 개요," *초전도와 저온공학*, 제9권, 제1호, pp.4-8 (2007).

저자이력

장호명(張鎬明)

1960년 9월 21일 생, 1983년 서울대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1988년 미국 M.I.T. 기계공학과 졸업(Ph.D.), 1997-8년, 2002-4년 미국 FSU NHMFL 객원교수, 1990년-현재 홍익대학교 기계시스템 디자인공학과 교수, (사) 한국 초전도·저온공학회 국제·기획 이사.

