Brayton 및 Claude 냉동기

장 호 명
홍익대학교 기계시스템디자인공학과

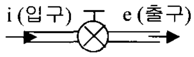
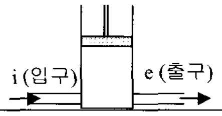
1. 서 론

열교환형 극저온냉동기 중에서 "대용량" 냉동기로 대표되는 두 가지가 Brayton냉동기와 Claude냉동기이다. 이 냉동기들은 고압 냉매가 외부로 일을 하면서 팽창하는 팽창기(expander)를 가장 중요한 핵심부품으로 사용하고 있다. 극저온 팽창기도 상온용 팽창기와 마찬가지로 왕복동(reciprocating) 팽창기와 터보(turbo) 팽창기가 있으나, 극저온으로 열유입을 줄이기 위한 단열(thermal insulation)과 극저온 운동부에 대한 윤활(lubrication) 등을 포함한 특수 설계 및 제작 기술을 필요로 한다.

저온공학의 역사를 보면, 20세기 초에 실험실 규모로 헬륨의 액화(약 4 K)에 성공하였으나, 1940년대 중반에 대형 헬륨액화기가 개발되면서 저온공학의 실용화 시대를 열게 되었다. 이 헬륨액화기의 개발에 가장 중요한 역할을 한 요소가 바로 이 극저온용 팽창기[1-2]이며, 열역학 구성은 Brayton 또는 Claude 사이클에 기초를 두고 있다. 특히 헬륨, 수소, 네온과 같은 저온기체는 최대 역전온도(inversion temperature)가 상온보다 낮으므로[3], JT밸브를 통한 등엔탈피 팽창만으로는 냉동이 불가능하며, 반드시 팽창기를 사용해야 한다.

팽창기에서 기체가 외부로 일을 팽창하는 과정은 이상적으로 등엔트로피(isentropic) 과정으로 모델링한다. 표 1은 등엔탈피 팽창 과정과 등엔트로피 팽창 과정을 비교하고 있다. JT밸브 등을 통한 등엔트로피 과정은 매

표 1. 등엔탈피 팽창 및 등엔트로피 팽창

	등엔탈피 팽창 (JT 밸브)	등엔트로피 팽창 (팽창기)
기기 구성	밸브, 모세관 	왕복동 팽창기, 터보팽창기 
에너지 균형	Q(열) = W(일) = 0 $h_i = h_e$	Q(열) = 0, W(일)>0: 외부로 일 $W = h_i - h_e > 0$
압력변화	$P_i > P_e$	$P_i > P_e$
온도변화	액체(또는 초임계유체)의 경우 $T_i > T_e$ 이상기체의 경우: $T_i = T_e$ 매우 고압기체의 경우: $T_i < T_e$	모든 경우에 큰 온도 강하 $T_i > T_e$
엔트로피변화	엔트로피 생성(비효율적) $s_i < s_e$	이상적으로 엔트로피 보존 $s_i = s_e$
장 점	매우 간단한 기구	효율적인 냉동
단 점	◆ 기체의 경우 냉동효과 적음 => 낮은 온도로 예냉이 필요 ◆ 불순물 응고로 밸브가 막힘	◆ 극저온에서 윤활 및 마모 ◆ 진동 및 소음 ◆ 설계 및 가공에 고도의 기술

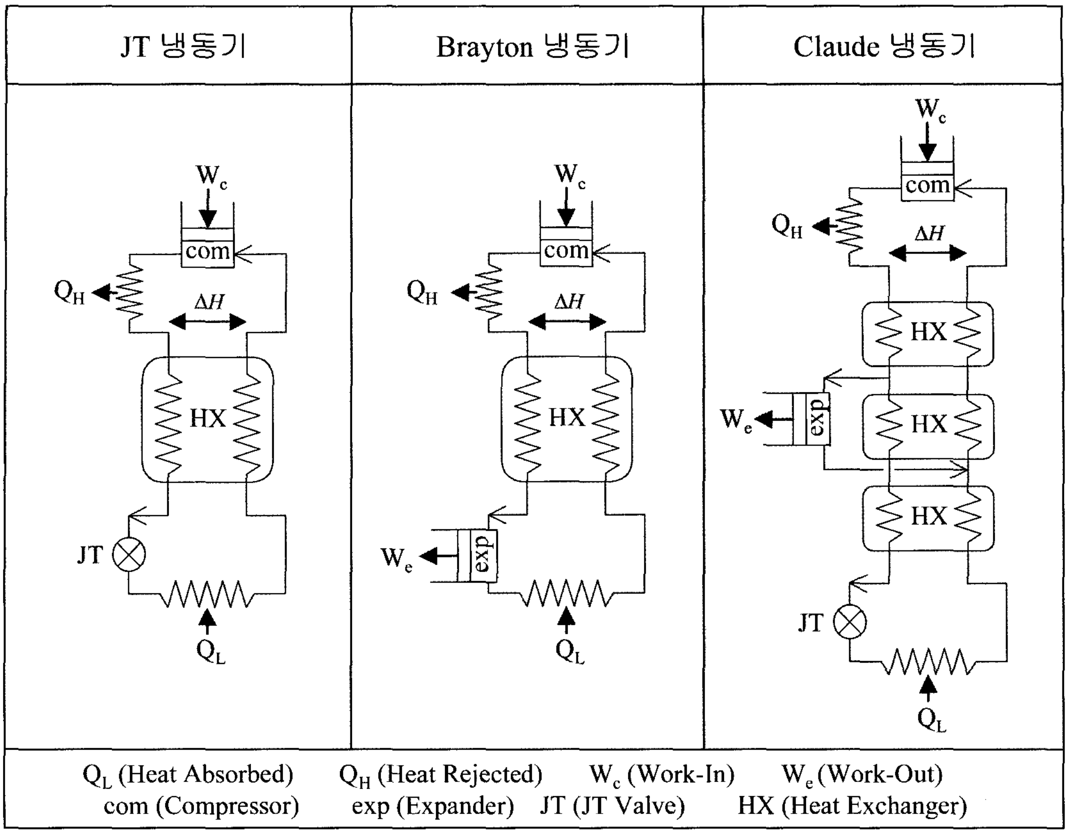


그림 1. JT냉동기, Brayton냉동기, Claude냉동기의 구성 및 주요 부품

우 간단히 구현이 될 수 있으나, 근본적인 비가역 (즉, 엔트로피가 생성되는) 과정으로 비효율적인 반면, 팽창기를 통한 등엔트로피 과정은 기술적으로 구현하기 어려우나 대용량이나 고효율의 극저온 냉동을 위해서는 반드시 필요한 과정이라 할 수 있다.

이 글에서는 극저온용 팽창기를 사용하는 사이클의 기본적인 구성 및 열역학적 원리를 간략히 설명하고, 실제 팽창기의 기술현황과 실제 응용 사이클의 몇 가지 예를 선택적으로 소개한다.

2. 사이클의 기본 구성

그림 1은 향류(counterflow) 열교환기를 중심으로 하는 극저온 냉동기 중에 가장 간단한 구성이 JT냉동기와 Brayton냉동기 및 Claude냉동기가 어떻게 다른가를 도식적으로 나타내고 있다. JT냉동기는 일반 냉동이나 공기조화에 널리 사용되고 있는 증기압축(vapor compression) 냉동사이클에 열재생용 열교환기를 추가한 구성이다. JT냉동기에서 저온의 열을 흡수하는 냉동량(Q_L)은 에너지 균형에 따라

$$Q_L = \Delta H = m\left[h(P_L) - h(P_H)\right]$$

로 계산되며, 여기에서 ΔH는 그림 1에 표시한 바와 같이 열교환기(HX) 고온부에서 저압부과 고압부의 엔탈피 차이를 나타낸다. 열교환기의 성능이 아무리 우수하다고 하더라도 이 엔탈피 차이는 냉매의 압력 변화에 따른 열역학 상태량(property)으로 결정되어, 가능한 냉동량에 절대적 한계가 있게 된다.

Brayton냉동기는 JT냉동기에서 JT밸브를 팽창기로 대치한 구성을 하고 있다. 팽창기에서는 냉매가 외부로 일을 하므로, 냉동기의 저온부에 대한 에너지 균형을 고려하면

$$Q_L = \Delta H + W_e$$

로 계산된다. 따라서 ΔH가 매우 작더라도 (심지어 음수 값을 가질 경우에도) 팽창일(W_e)에 의해 충분한 냉동을 얻을 수 있다.

Claude냉동기는 저온부의 JT밸브를 그대로 사용하되, 고압냉매의 일부를 추출하여 팽창기를 통해 팽창시킨 후, 저압 측에 혼합하는 구성을 한다. 그림 1과 같이 Claude냉동기는 3개의 열교환기가 직렬로 위치하게 되는데, 고온부 열교환기와 저온부 열교환기는 고압냉매의 유량과 저압냉매의 유량이 각각 동일하지만, 중간 열교환기의 경우에는 저압부의 유량이 더 크게 된다.

그림 2는 이 유량의 차이가 열교환기의 온도차에 미치는 영향을 설명하고 있다. 팽창기가 없을 경우, 두 유량은 동일하지만 온도가 낮아질수록 고압 측의 비열이 저압 측보다 더 크다. 따라서 열교환기의 저온부로 갈수록 온도차가 더 커지는 경향이 있으며, 이는 결과적으로 더 많은 엔트로피가 생성되어 냉동 성능이 낮아진다. 반면에 팽창기가 있을 경우, 저압 측의 유량이 고압 측의 유량보다 커서 저온부에서의 온도차를 줄이는 효과를 나타내며, 궁극적으로 냉동의 효율과 용량을 모두 증가시키는 역할을 하게 되는 것이다.

Claude사이클의 설계에 가장 중요한 변수는 팽창 유량비(냉매의 압축 유량에 대한 팽창기를 통과하는 유량의 비)이다. 팽창유량비가 0이면 단순한 JT냉동기이며, 팽창유량비가 1이면 (Brayton사이클과 유사하나) 냉동을 수행하는 냉매가 없으므로, 이 사이에 반드시 최적의 유량비가 존재하게 된다.

Brayton냉동기와 Claude냉동기는 열역학 구성과 특징이 매우 유사하나, Brayton냉동기는 냉매가 모두 기체 상으로 운전되는 사이클이며 Claude냉동기는 저온부에서 냉매가 액체로 응축된 후 증발하면서 냉동을 수행하는 상변화 사이클이다.

3. 극저온용 팽창기

팽창기는 압축기의 역 과정으로 운전되는 기기이며, Brayton냉동기와 Claude냉동기의 핵심 부품이다. 현재까지 개발되어 사용되는 극저온용 팽창기는 왕복동 팽창기와 터보 팽창기가 있으며, 최근에는 스크롤 팽창기가 시험 및 연구의 단계에 있다.

왕복동 팽창기는 일반적인 팽창엔진과 같이, 크랭크 축에 의해 왕복운동을 하는 피스톤-실린더 조합에 밸브로 유체의 출입을 제

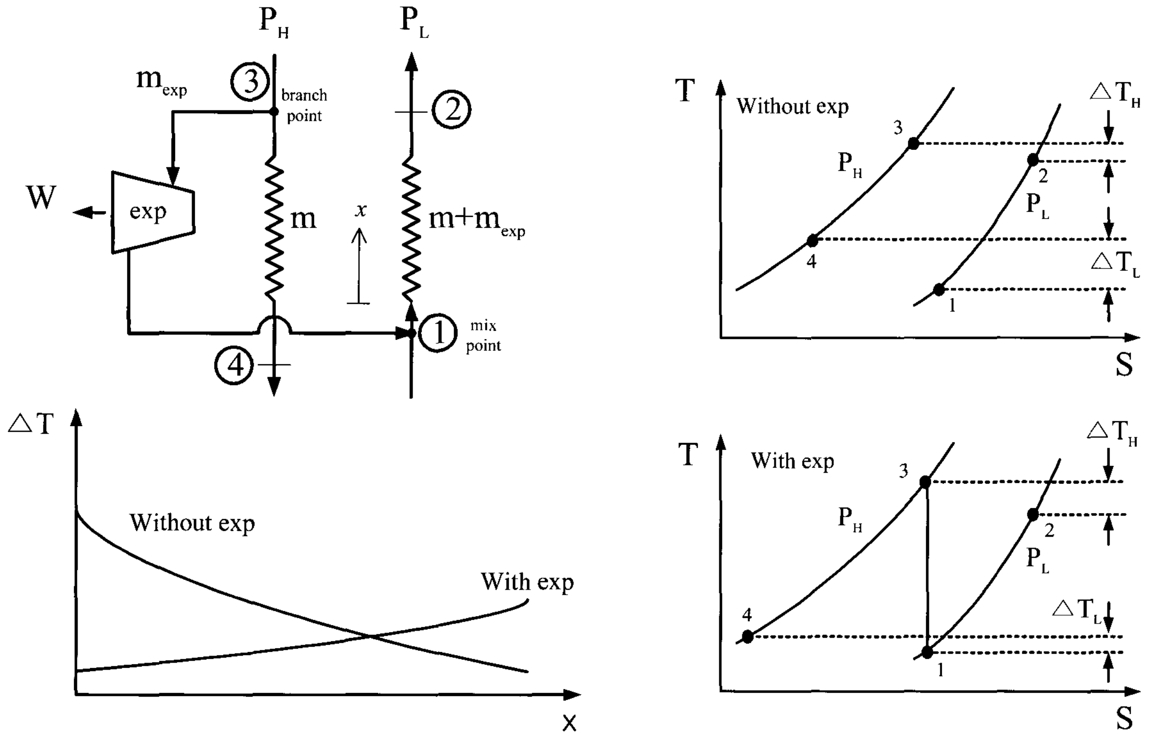
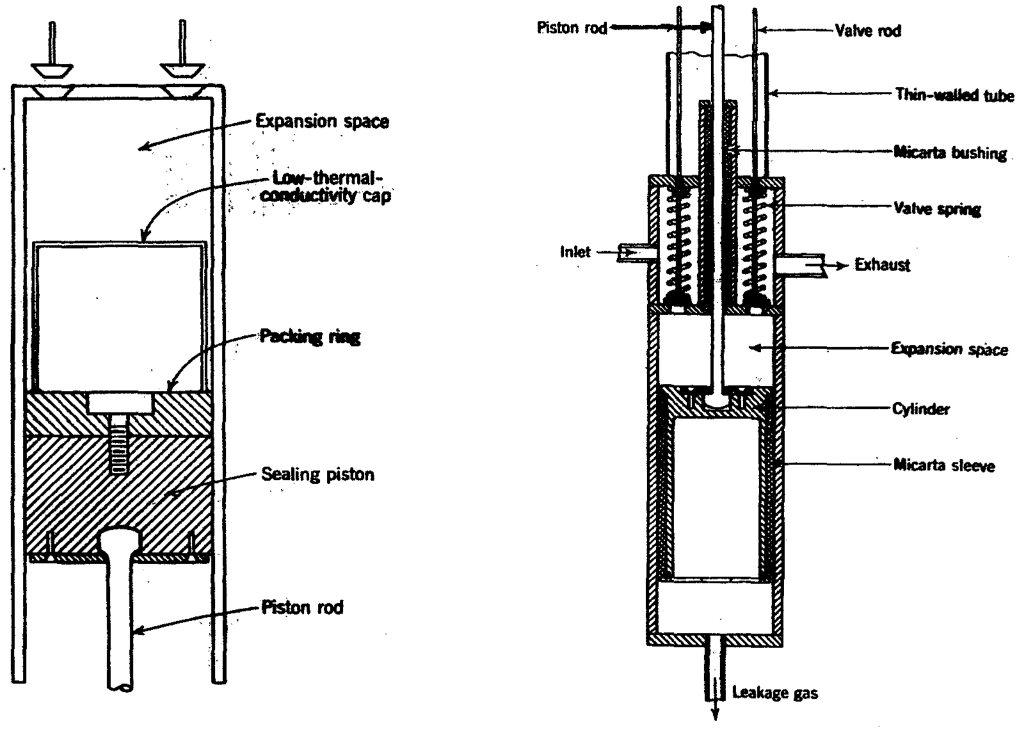


그림 2. Claude냉동기에서 열교환기(HX)의 온도차 해석



Heylandt 팽창기 (실패) **Collins팽창기 (성공)**

그림 3. Heylandt 및 Collins가 설계한 극저온용 왕복동 팽창기의 구조

어하는 구조를 갖는다. 그림 3은 개발 초기에 제작된 두 가지의 왕복동 팽창기 구조를 나타내고 있다. Heylandt의 팽창기는 일반 팽창엔진과 유사한 구성을 하여, 피스톤 로드와 밸브 로드가 압축력을 받기 때문에 기계적 강도를 위한 단면적이 극저온의 열유입에 원인이 되어 냉동에 성공하지 못하였다. 반면에 Collins의 팽창기는 피스톤 로드와 밸브 로드가 항상 인장력을 받도록 설계하여, 적은 단면적으로 열유입의 량을 줄였고, Micarta라는 복합재료로 고체윤활을 실현하여 극저온 팽창기로 성공하게 되었다.

극저온용 터보 팽창기는 그림 4와 같이 일반 터빈과 매우 다른 구조를 갖고 있다. 그림 하부의 익형 블레이드에 고압기체가 중심부로 유입되어 팽창하는 극저온부를 형성하고 있는데, 저온 열유입의 영향을 줄이기 위해 회전체의 지름은 작게, 그리고 회전속도는 크게 설계한다. 일반 터빈과 달리 회전축을 매우 길게 제작하여 그림 상부의 실온부에서 윤활 및 동력 추출의 기능을 수행한다. 소형 터보팽창기는 최대 50만 rpm의 초고속으로 운전되는데, 이 경우 압축공기가 기체 베어링 및 브레이크의 역할을 한다.

팽창기의 열역학적 성능은 보통 단열효율(adiabatic efficiency)로 나타내는데, 이는 동일한 압력 조건에서 발생한 실제 동력에

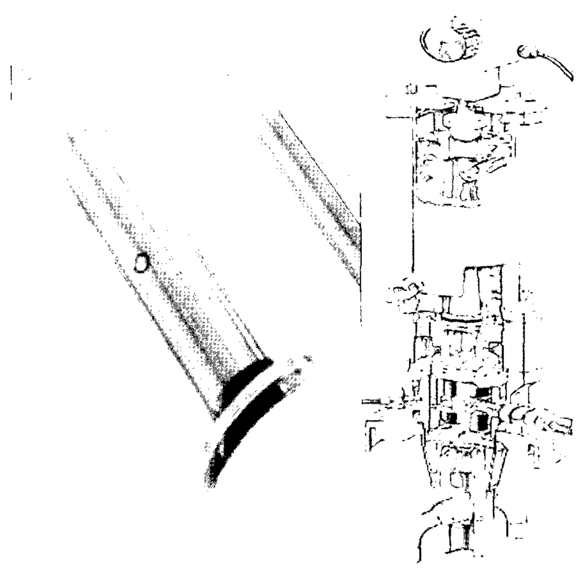


그림 4. 소형 터보 팽창기의 구조

대한 이상적인 최대 동력의 비로 정의된다. 최대 동력은 엔트로피가 생성되는 않는 단열 과정을 통해 얻어지므로, 이상기체로 간주할 경우 단열효율은 아래 식으로 계산한다.

$$\eta_{\exp}=\frac{W}{W_{\max}}=\frac{T_i-T_e}{T_i\left[1-\left(P_L/P_H\right)^{(k-1)/k}\right]}$$

여기에서 T_i와 T_e는 각각 입구온도와 출구온도이고, P_L과 P_H는 각각 출구압력과 입구압력이며, k는 기체의 비열비(specific heat ratio, 정압비열/정적비열)를 나타낸다. 극저온용 팽창기의 단열효율은 보통 0.70~0.85의 범위로 보고되어 있다.

4. 실제 응용 사이클

Brayton 및 Claude 사이클을 응용한 실제 극저온 냉동기의 종류는 대단히 많은데, 대표적인 몇 가지를 소개하면 다음과 같다.

(1) 헬륨 액화용 Collins냉동기

Claude사이클 응용 냉동기 중에 역사적으로 가장 중요한 냉동기는 헬륨을 대용량 액화를 실현한 Collins냉동기이다. 그 구성은 그림 5와 같이 왕복동 팽창기 2개를 직렬로 설치한 형태로, 2단식 Claude냉동기라고 할 수 있다. 5개의 향류 열교환기들의 크기와 두 팽창기로 추출되는 팽창 유량비들을 동시에 최적화 하여 효과적인 4 K의 냉동을 수행하게 된다.

(2) 터보 팽창기 사이클

터보 팽창기는 왕복동 팽창기에 비해 작동 압력비가 작다. 보통 JT밸브를 사용하는 헬

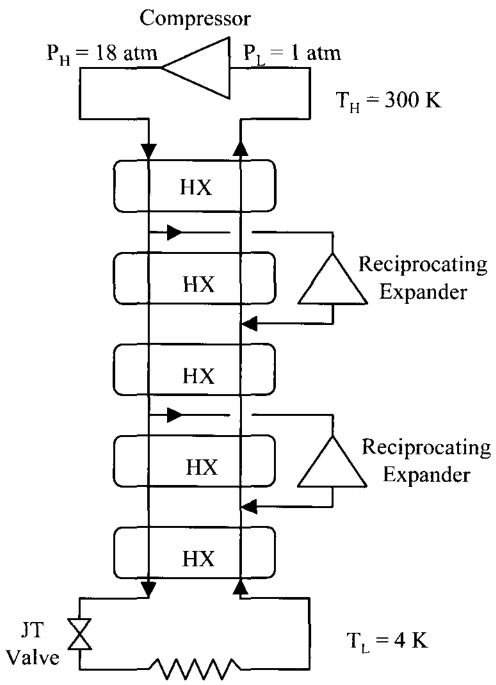


그림 5. 헬륨액화용 Collins냉동기

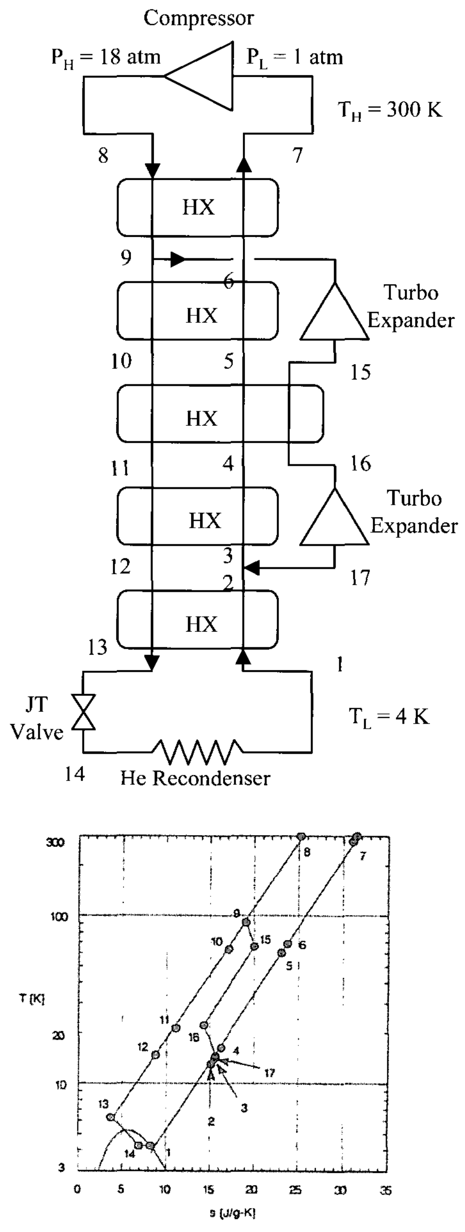


그림 6. 터보 팽창기 Claude사이클

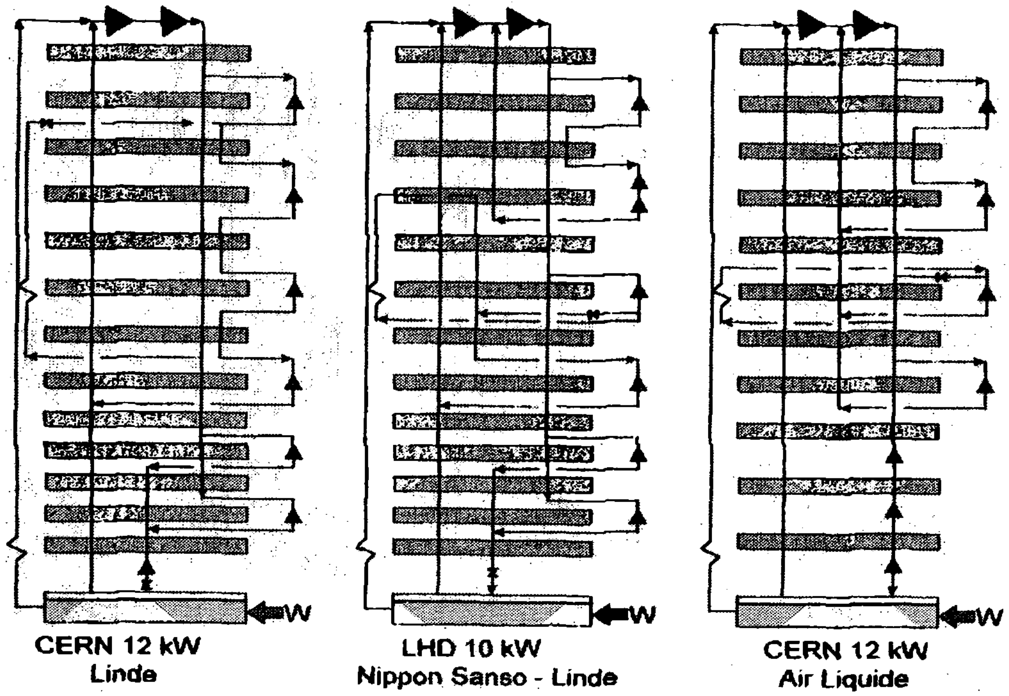


그림 7. Linde사(독일)와 Air Liquide사(프랑스)의 대용량 헬륨 냉동기

륨 사이클에서 최적의 압축압력은 약 18기압이며, 터보 팽창기를 사용하는 냉동사이클은 그림 6과 같은 구성을 한다. 기본적으로 그림 5의 Collins냉동기와 유사하나, 상부의 터보 팽창기는 약 18기압에서 중간압력(예: 5기압)까지 팽창한 후 하부의 터보 팽창기에서 1기압까지 팽창하는 2단 팽창(two-stage expansion) 사이클인 셈이다. 이 경우 5개의 열교환기 중에서 중심부에는 3중 유로(triple-passage) 열교환기가 필요하다. 그림 6의 아래 그래프는 중간압력과 팽창질량비를 최적화[7]한 결과를 헬륨의 온도-엔트로피 선도에 나타낸 것이다.

(3) 대용량 헬륨 냉동기

입자 가속기나 핵융합 등에 사용되는 마그네트는 4 K에서 10 kW 급의 대용량 냉동을 필요로 한다. 유럽의 CERN, 일본의 LHD, 한국의 KSTAR 등에 적용되는 냉동기는 독일의 Linde사 또는 프랑스의 Air Liquide사에 의해 특별히 설계 및 제작되었는데, 그 구성을 그림 7에 나타내었다. 매우 복잡한 구조이나, 원리는 앞서 설명한 Claude 사이클 및 다단 터보 팽창기 등을 조합한 결과라고 할 수 있다.

(4) 근적외선 카메라용 Brayton냉동기

그림 8은 미국 NICMOS 프로그램에서 채택한 Brayton냉동기를 나타내고 있다. 상부에 수냉식 압축기가 있고, 진공용기의

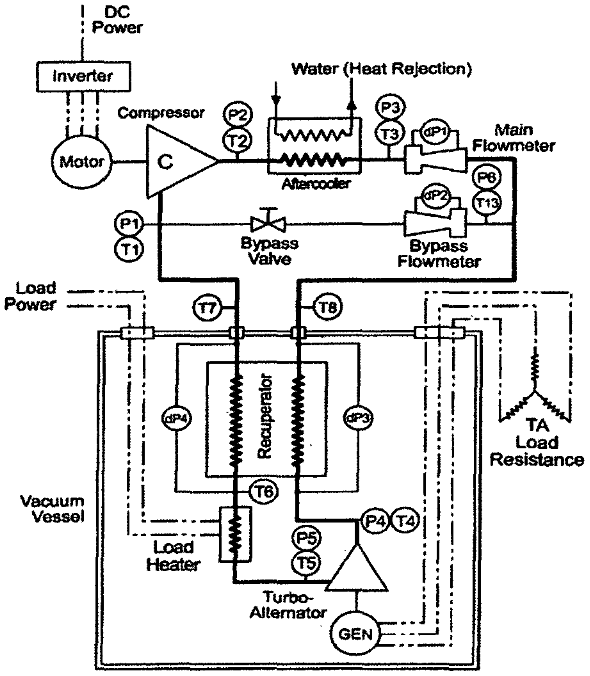


그림 8. 근적외선 카메라용 Brayton 냉동기

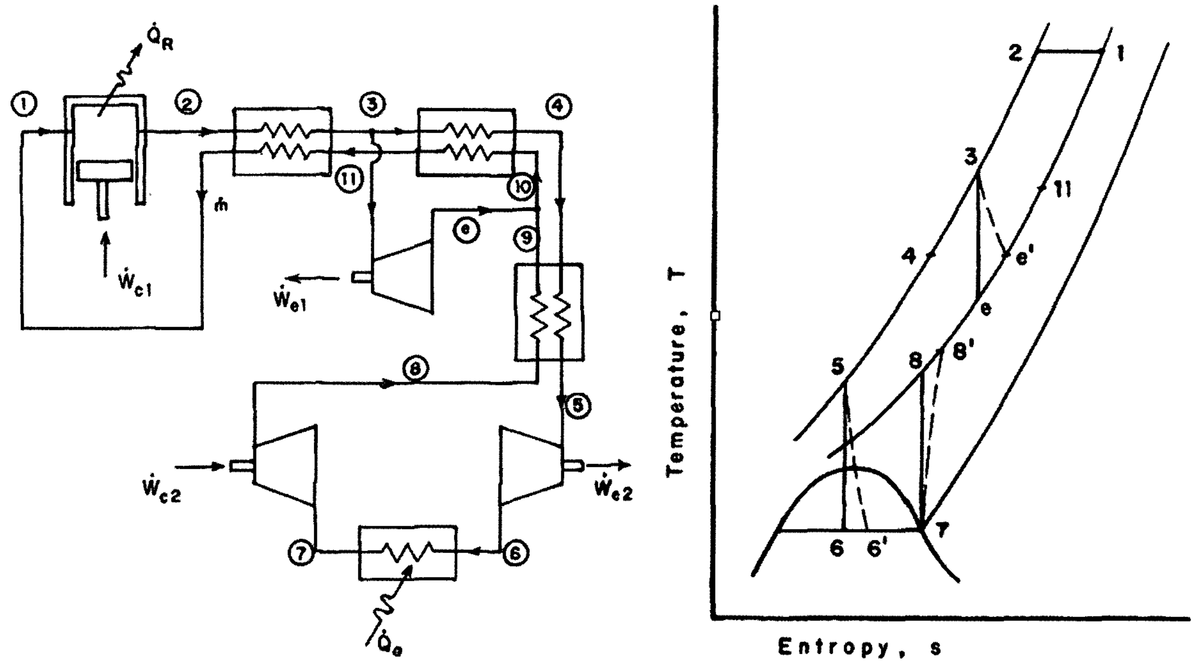


그림 9. 습식 팽창기 및 저온 압축기를 이용하는 헬륨 냉동기

중심부의 Recuperator가 향류 열교환기이며, 우측의 터보 팽창기를 통해 발전기를 구동한 후 좌측의 열부하로 유동하는 시계 방향의 사이클이 구성된다.

(5) 습식 팽창기 사이클

일반적으로 기체가 팽창하는 동안 액체가 생성되면 팽창기의 동작이 매우 어렵고 효율이 감소하나, 헬륨의 경우에는 액체와 증기의 밀도 차이가 그리 크지 않아 습식 팽창기(wet expander)의 운전이 가능하다. 그림 9는 Claude사이클의 저온부에 습식 팽창기와 저온 압축기(cold compressor)를 이용한 헬륨 냉동기의 구성과 온도-엔트로피 선도를 나타내고 있다. JT밸브를 이용하지 않으므로, 이 사이클의 고압은 18기압이 아니어도 효율적인 냉동이 가능하며, 사이클의 저압도 대기압보다 높아도 4 K의 냉동을 얻을 수 있다. 경우에 따라서는, 냉동을 수행하는 6-7과정의 압력으로 대기압 이하로 하여 4 K 이하의 냉동도 가능하다.

5. 맺음말

최근에는 국내에서도 대용량 극저온 냉동기의 수요가 여러 산업 분야에서 나타나고 있다. 필자가 알고 있는 범위에서 몇 가지 대표적인 예를 살펴보면

(1) KSTAR의 핵융합로 마그네트 냉각을 위한 대용량 2-4 K 냉동

(2) 실험용 하나로 원자로의 냉중성원(cold neutron source)에서 액체수소 냉각을 위한 대용량 20 K 냉동

(3) 실용화가 기대되는 HTS 케이블 또는 HTS 변전소에서 액체질소의 과냉각을 위한 대용량 65-77 K 냉동

(4) LNG선박에 탑재하여 증발기체(BOG)의 재액화(re-liquefaction)를 수행하기 위한 대용량 110 K 냉동

(5) 매립가스(land-fill gas) 재활용을 위한 메탄가스 분리-액화용 대용량 110 K 냉동

등이 있다.

이러한 대용량의 극저온 냉동을 수행하기 위해서는 반드시 저온용 팽창기를 사용하는 Brayton 또는 Claude 응용 사이클이 채택된다. 이런 사이클의 핵심 부품인 팽창기는 기술적으로나 경제성 면에서 단기간에 국산화를 기대하기 어려운 현실에 있다. 그러나 팽창기를 제외하면, 열교환기 등의 기타 부품은 국산화가 가능하다고 할 수 있다.

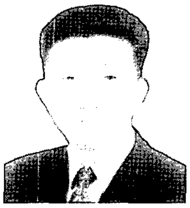
따라서 이러한 냉동사이클에 대한 열역학 설계와 시스템 구성을 위한 연구가 이루어진

다면, 대용량 극저온 냉동기의 국산화 개발도 멀지 않은 장래에 이룰 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

[1] S.C. Collins and R.L. Cannaday, Expansion Machines for Low Temperature Processes, Oxford University Press, London (1958)
[2] A. Bejan, Advanced Engineering Thermodynamics, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York (1997)
[3] R.F. Barron, Cryogenic Systems, 2nd ed., Oxford University Press, New York (1985)
[4] G. Walker, Cryocoolers, Part 1: Fundamentals, Plenum Press, New York (1983)
[5] 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)
[6] 김영인, 장호명, "극저온 냉동기(IV)," 공기조화·냉동공학, 제20권, 제1호, pp.60-74, 대한설비공학회 (1991)
[7] 백종훈, 장호명, "터보팽창기를 이용한 2단 팽창 Claude 냉동사이클 해석," 공기조화·냉동공학논문집, 제6권, 제2호, pp.130-139 (1994)
[8] 장호명, 저온공학의 기초와 응용, 제6장 대형 저온 냉동 시스템, KAIST 산학연 공개강좌 강연집 (2005)

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 기계시스템디자인공학과 교수.