

극저온냉동기 개요

장 호 명

홍익대학교 기계시스템디자인공학과

1. 서 론

극저온냉동기는 밀폐사이클(closed cycle)로 운전되면서 극저온에서 열을 흡수하여 상온으로 열을 방출하는 기기를 의미한다. 정확한 기술용어는 영어로 cryogenic refrigerator이고, 1970년대 이후에 개발된 "소형" 극저온냉동기를 간단히 cryocooler로 표기하고 있으며, 최근에는 두 용어가 동일한 의미로 사용되는 경우가 많다.

초기의 극저온냉동기는 주로 헬륨, 수소, 질소와 같은 기체를 액화하는 목적으로 사용되었으나, 최근에는 초전도 시스템 또는 저온 전자/에너지 시스템 등의 연속운전을 위해 널리 사용되고 있다. 특히 일부 소형 초전도 시스템에서는 액체헬륨이나 액체질소가 전혀 필요없는 전도냉각 방식도 채택되고 있다. 극저온냉동기의 중요한 응용분야들을 간략히 정리하면 아래와 같다.

(1) 극저온 진공펌프 (cryopump)

압력 10^{-6} Torr이하의 고진공을 생성하기 위해 널리 사용되는 극저온 진공펌프는 약 20 K이하의 온도로 유지되는 확장관에 잔류 기체가 응축 및 흡착되는 원리를 이용하며, 현재까지 GM사이클의 극저온냉동기가 가장 많이 사용되는 분야이다.

(2) 증발기체의 재응축 (re-condensation)

저온액체를 이용하는 시스템에서 증발기체 (boil-off gas)를 극저온냉동기로 재응축하면, 액체를 주기적으로 공급하지 않고 연속운전이 가능하다. 의료용 자기공명영상(MRI) 초전도 마그네트나 단결정 성장용 초전도 마그네트 등의 냉각을 위한 액체헬륨(약 4 K)의 재응축이 대표적인 예라고 할 수 있다. 또 우주항공이나 에너지 분야에서 액체수소(약 20 K), 액체네온(약 27 K), 액체질소(약 77 K), 액체산소(약 90 K), 액화천연가스 (약 111

K) 등의 저장 및 운송 용기에 극저온냉동기를 장착하여, 이른바 ZBO (zero boil-off) 시스템을 구현할 수 있다.

(3) 전도냉각(conduction-cooling)

소형 초전도 시스템은 액체헬륨이나 액체질소를 전혀 사용하지 않고, 극저온냉동기가 금속을 통해 초전도체를 직접 전도 냉각한다. 단열용 복사 차폐막(radiation shield)이나 적외선(infrared) 또는 감마선(gamma ray) 센서 등의 냉동도 액체질소 없이 극저온냉동기의 전도냉각이 가능하다. 이러한 시스템은 냉동온도를 4-100 K범위에서 자유롭게 설계할 수 있고 냉동기 스위치만으로 손쉽게 극저온 환경에 도달할 수 있는 장점이 있으나, 초기 냉각시간 및 전기절연의 측면에는 약점이 있다.

(4) 저온액체의 과냉(subcooling)

고전압용 HTS 전력기기에 사용되는 액체질소는 냉각유체와 전기절연재의 역할을 동시에 수행한다. 액체질소를 포화온도(saturation temperature) 이하로 과냉각하면, 액체의 내전압 특성이 크게 증가하고 과부하에 대한 냉각특성이 대단히 우수하다. 저온액체의 과냉 상태는 극저온냉동기를 이용하여 유지한다.

국내에서 극저온냉동기가 처음으로 활용된 것이 1990년대 초에 불과하지만, 최근에는 앞에 기술한 모든 분야에서 극저온냉동의 수요가 점점 증가하고 있는 추세에 있다. 따라서 이제는 극저온 냉동에 대한 전문가가 아니더라도 어느 정도의 기술정보는 많은 회원들에게 매우 유익할 것으로 판단된다. 이번 특집호에서는 극저온 냉동의 기본 원리와 다양한 냉동기의 현재 기술 현황 등을 폭넓게 정리하기 위하여 기획되었다.

이 글에서는 극저온 냉동의 기본이 되는 열역학 이론을 간단히 소개하고, 냉동사이클의 구성에 따른 분류와 특징들을 전반적으로 정

표 1. 냉동온도에 따른 단위 냉동에 필요한 소요 동력

단위 냉동당 소요동력	T_L (냉동온도)			
	150 K	75 K	20 K	4 K
W_{min} / Q_L (가역냉동)	1	3	14	74
W / Q_L (실제 냉동기)	3 ~ 5	15 ~ 30	140 ~ 280	1000 ~ 2000

리한다. 뒤에 이어지는 원고들은 국내의 극저온 냉동 연구자들이 분류에 따라 또는 특수 응용분야에 따라 나누어 집필하였다.

2. 냉동기 열역학

극저온 냉동은 그림 1과 같이 저온(T_L)에서 열(Q_L)을 흡수하여 상온($T_H=300$ K)에 열(Q_H)을 방출하는 과정으로, 이 냉동을 수행하기 위해서는 전기적 또는 기계적인 동력(W)이 필요하다. 가장 이상적인 냉동기는 열역학적으로 엔트로피가 전혀 생성되지 않는 가역(reversible) 과정으로 구성되어야 하며, 이 때 필요한 최소일은

$$W_{min} = Q_L \left(\frac{300}{T_L} - 1 \right)$$

로 계산된다.

따라서 냉동 온도가 낮을수록 필요한 최소 일은 점점 증가하게 된다. 표 1은 냉동온도에 따라 1 W의 냉동을 하는데 필요한 최소 동력(Watts/Watt)을 나타내고 있다. 여기에서

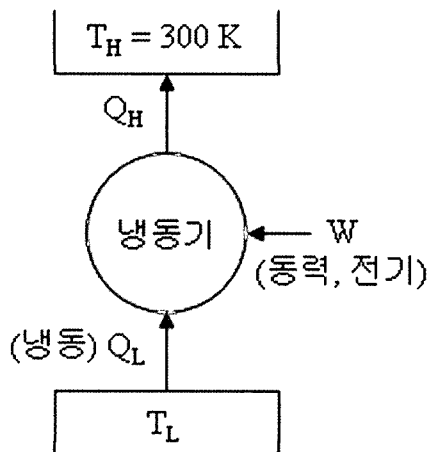


그림 1. 극저온냉동기의 에너지 균형

냉동온도가 낮을수록 더 많은 동력이 필요한 것은 기술적인 문제가 아니며, 온도의 본질이 그러하기 때문이다.

실제 극저온 냉동기는 이보다 더욱 많은 동력을 필요로 하며, 그 크기는 실제 과정에서 생성되는 엔트로피의 양으로 결정된다.

$$W = Q_L \left(\frac{300}{T_L} - 1 \right) + 300 \cdot S_{gen}$$

여기에서 S_{gen} 는 생성되는 엔트로피를 나타내며, 그 크기는 냉동기 사이클의 종류, 냉매의 특성, 실제 냉동기의 성능 등에 따라 다르며, 실제 소비동력의 대체적인 크기를 표 1에 나타내었다.

주어진 냉동온도에서 최소 동력에 대한 실제 동력의 비를 냉동효율 또는 FOM(figure of merit 또는 %Carnot)으로 정의된다.

$$FOM = \frac{W_{min}}{W} = \frac{Q_L (300/T_L - 1)}{W}$$

일반적으로 FOM도 냉동온도가 낮을수록 작아진다. 액체질소 온도인 77 K 근처에서 1 W의 냉동을 수행하는데 필요한 이상적인 냉동기 최소 동력은 약 3 W이고, 상업용 냉동기의 실제 소비동력이 약 15~30 W 정도이므로, FOM으로는 대체로 20~10%의 범위에 해당한다. 액체헬륨 온도인 4 K 근처에서 1 W의 냉동을 수행하는데 필요한 최소동력은 약 74 W이고, 실제 냉동기의 소비동력은 1~2 kW이므로, FOM은 대체로 3~7%의 범위에 있다.

3. 극저온냉동기의 분류

극저온냉동기를 열역학적 구성에 따른 분류를 표 2에 나타내었고, 도식적인 구성 및 주요 부품을 그림2에 나타내었다. 고압

유체와 저압유체 사이에 에너지 교환하는 방식에 따라 열교환형(recuperative) 및 열재생형(regenerative)으로 구분한다.

열교환형은 두 유체가 다른 공간을 서로 반대 방향으로 정상 유동하며 에너지를 교환하는 향류 열교환기(counterflow heat exchanger)를 사용하며, 열재생형은 유동 방향으로 온도구배가 있는 축열재가 채워진 한 공간을 유체가 주기적으로 왕복 유동하면서 축열 및 방열을 반복하는 재생기(regenerator)를 사용한다.

일반적으로 열재생기는 향류 열교환기에 비해 제작이 용이하고 체적에 비해 매우 넓은 열교환 면적을 가지므로, 열재생형 냉동기는 주로 소용량 냉동에 사용된다. 그러나 대부분의 축열 재료는 20 K 이하의 온도에서 비열이 급격하게 줄어들어 10 K보다 낮은 온도의 냉동에는 효과적이지 않다. 반면에 열교환 냉동기는 대용량 냉동에 더욱 적절하며, 액체헬륨 온도인 4 K에도 적용이 가능하다. 1990년대 초반에는 10 K 근처에서 비열이 매우 높은 희토류(rare earth) 물질이 발견되어 4 K에 도달이 가능한 소용량 열재생형 냉동기도 상업화에 성공하였다.

열교환형 냉동기는 저온에 도달하는 팽창 방법에 따라 JT(Joule-Thomson)밸브를 이용하는 등엔탈피(isenthalpic) 팽창과 팽창기(expander)를 이용하는 등엔트로피(isentropic) 팽창으로 구분한다.

JT밸브는 매우 간편한 기기이나 많은 엔트로피가 생성되어 효율이 낮은 반면, 극저온용 팽창기는 설계와 제작이 어려운 기기이나 효율 측면에서 월등히 유리하다. 등엔탈피 팽창만 이용하는 사이클은 JT냉동기이고, JT밸브와 부분적인 팽창기를 이용하는 사이클이 Claude냉동기이며, 팽창기만 이용하는 사이클이 Brayton냉동기이다. JT냉동기와 Claude냉동기는 극저온에서 냉매가 액체로 응축(condense)되는 상변화 사이클이며, Brayton냉동기는 기본적으로 기체 사이클이다.

열재생 사이클인 Stirling냉동기는 열교환 방식을 제외하면 Brayton냉동기와 매우 흡사하다. 열재생기가 매우 우수할 때, 냉동량 Q_L 은 팽창기가 외부로 하는 일 W_e 와 동일하므로, Stirling냉동기의 냉동효율은 매우 높고 열재생형 냉동기 중에서 가장 오래 전에 개발되어 사용되고 있다.

VM(Vuilleumier)냉동기는 Stirling엔진과 Stirling냉동기를 일체형으로 구성하여, 전기/기계적 동력이 아닌 열로 냉동을 수행하는 특수 냉동기로 인공위성 등의 우주분야에 활용되고 있다.

1960년대 초에 새로운 냉동사이클을 고안한 Gifford와 McMahon의 이름을 따서 부르는 GM냉동기는 Stirling냉동기의 팽창기를 변위기(displacer)로 대체한 구성을 하고 있다. 변위기는 팽창기보다 기계적 신뢰성이 월등히 높아서 1970년대에

표 2. 열역학 사이클에 따른 극저온냉동기의 분류

분 류	냉동기 사이클	냉 매	저온생성 원리	특 징
열교환형	JT (Joule-Thomson)	상변화 냉매 (기체-액체)	JT밸브	에너지필요
	Claude		팽창기 + JT밸브	대용량
	Brayton			
열재생형	Stirling	기체 냉매 (주로 헬륨)	팽창기 (expander)	고효율
	VM (Vuilleumier)			열구동
	GM (Gifford-McMahon)		변위기(displacer)	대량생산
	맥동관 (pulse tube)		맥동관	고신뢰성
기 타	자기 (magnetic)	상자성(paramagnetic)	탈자화(demagnetization)	2 K이하
	희석 (dilution)	$He^3 + He^4$	상분리(phase separation)	

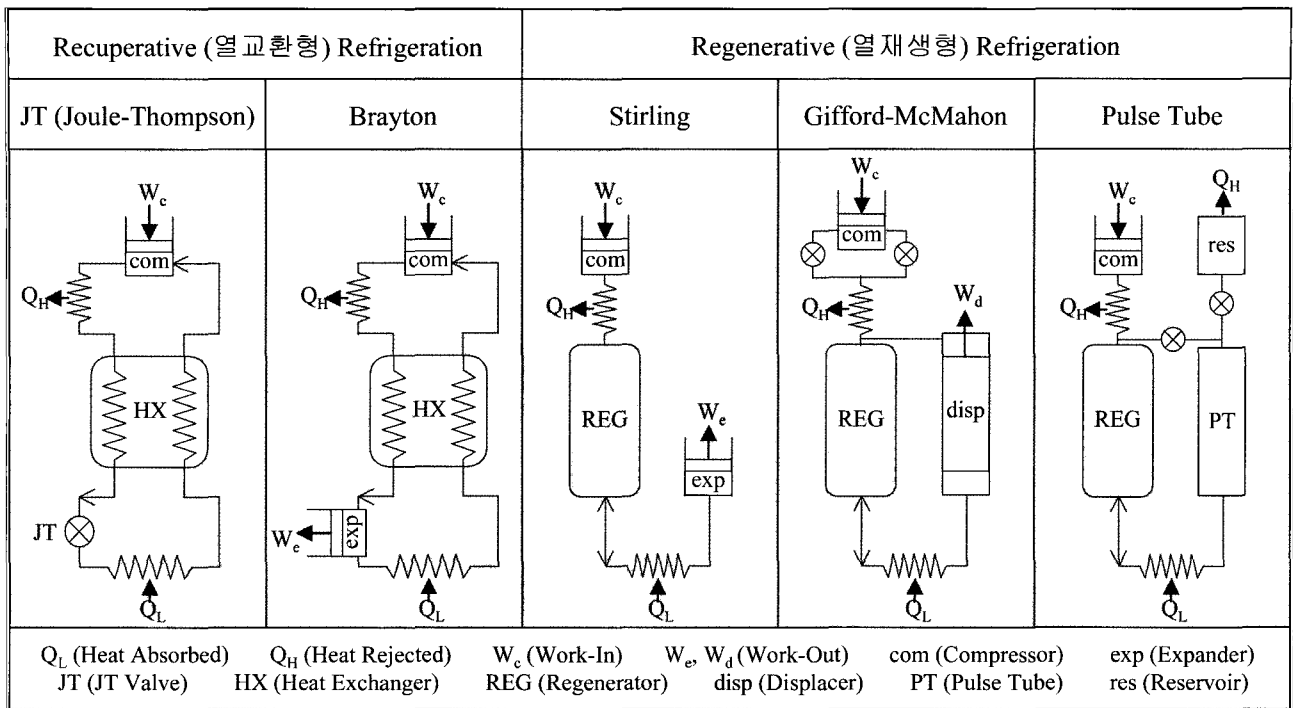


그림 2. 주요 극저온냉동기의 도식적 구성 및 주요 부품

극저온냉동기의 실용화에 결정적인 계기가 되며, 실제로 현재까지도 GM냉동기가 상업용 극저온 냉동기의 대부분을 차지하고 있다. 반면에, GM냉동기는 변위기에서의 엔트로피 생성으로 인해 Stirling 냉동기보다 냉동 효율이 낮다.

1990년대 이후에 본격적으로 개발되고 있는 맥동관(pulse tube) 냉동기는 축방향의 온도구배(temperature gradient)가 있는 빈 튜브의 벽면에서 맥동 유체의 표면 열전달을 이용하는 원리를 이용한다. 저온 운동부가 전혀 없기 때문에 기계적 신뢰성이 GM냉동기보다 더욱 높아졌으나 냉동 효율이나 냉동 용량에 있어서는 아직 개선의 여지가 많다. 맥동관 냉동기는 압축 방식(연결되는 밸브의 유무)에 따라 Stirling형 맥동관 냉동기와 GM형 맥동관 냉동기로 구분한다.

이밖에 2 K 이하의 냉동을 위한 대표적인 냉동기로 자기(magnetic) 냉동기와 희석(dilution) 냉동기를 들 수 있다. 자기 냉동기는 압축성 유체의 압축-팽창 대신 상자성(paramagnetic)체의 자화-탈자화를 통한 일로 냉동 사이클을 구성한다. 희석 냉동기는 헬륨의 동위원소인 He^4 와

He^3 의 초유체(superfluid) 상분리 특성을 이용하여, 1 mK 이하의 낮은 온도를 얻는데 사용되고 있다.

그림 3은 각종 상업용 냉동기의 냉동 효율(FOM, %Carnot)을 냉동용량 및 냉동 온도별로 나타낸 그래프이다. 이 자료는 1974년에 T.R. Strohbridge가 정리한 바탕에 2002년까지 개발된 냉동기의 성능 및 향후 낙관적 예측을 추가한 것이다. 수 W급의 소용량 냉동기는 5% 이하의 낮은 값을 나타내고 있으며, 수백 W급의 중용량 냉동기가 10~20% 범위에 있고, 수십 kW이상의 대용량 냉동기가 30% 또는 그 이상에 이르고 있음을 알 수 있다. 상부에 빗금친 부분은 최근에 개발 중인 Stirling형 맥동관 냉동기의 기대 범위를 나타내고 있으나, 아직은 소용량 냉동기에 대해서만 실험적으로 개발되었음을 보여주고 있다.

4. 맺음말

극저온냉동기는 열역학 구성에 따라 매우 다양한 특성을 갖고 있다. 이 특집호의 원고들은 여러 회원들이 이러한 특성을 이해하는데 매우 유용한 기술정보가 될 것으

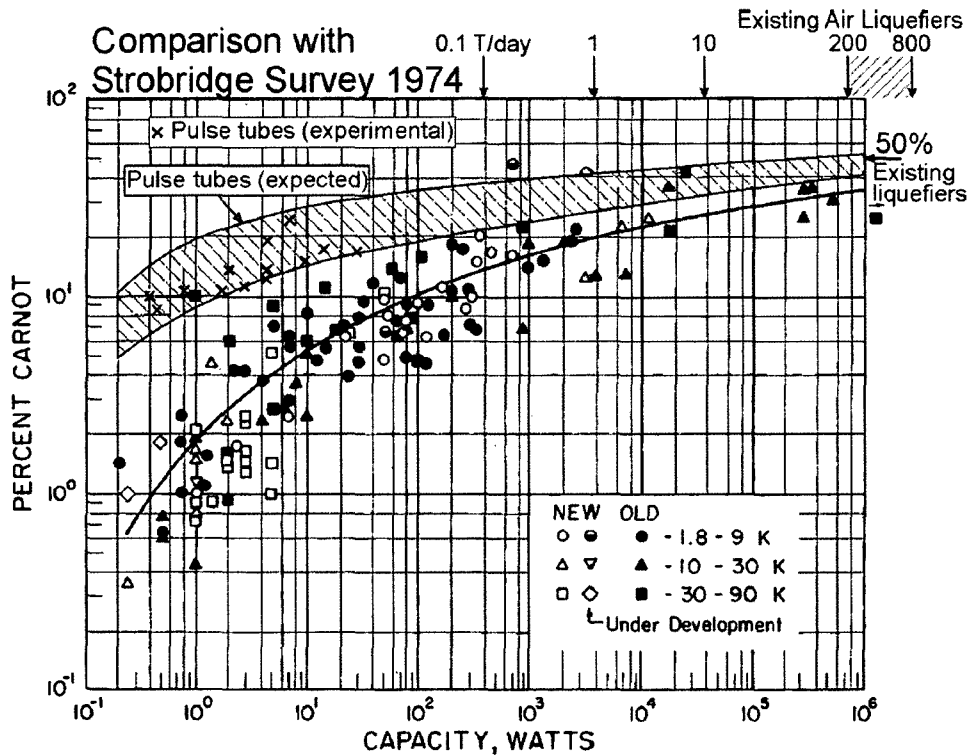


그림 3. 냉동온도 및 용량에 따른 상업용 냉동기의 냉동효율 [3]

로 믿는다. 또한 국내 극저온냉동기 및 관련기술의 연구개발에 대한 관심과 지원을 더욱 높이는 기회가 될 것으로 기대한다.

마지막으로 바쁘신 중에도 이 특집호 원고를 집필해 주신 여러 저온공학 연구자들과 깊은 감사의 말씀을 드린다.

참고문헌

[1] R.F. Barron, Cryogenic Systems, 2nd ed., Oxford University Press, New York (1985)
 [2] G. Walker, Cryocoolers, Part 1: Fundamentals, Plenum Press, New York (1983)
 [3] M.J. Gouge, J.A. Demko, B.W. McConnell, and J.M. Pfothenauer, Cryogenic Assessment Report, Oak Ridge National Laboratory Report (2002)
 [4] H.J. Ter Brake, "State-of-the-art review on low-power cryocoolers," ICEC 20, Beijing, China (2004)

[5] 김영인, 장호명, "극저온냉동기(I)," 공기조화냉동공학, 제18권, 제6호, pp. 509-514, 대한설비공학회 (1989)
 [6] 장호명, "초전도와 극저온 냉동," ESE, 제3호, pp.38-39, 차세대 초전도응용기술 개발사업단 (2004)
 [7] 장호명, 저온공학의 기초와 응용, 제6장-제8장, KAIST 산학연공개강좌 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.), 1997-98년, 2002-04년 미국 FSU NHMFL 객원교수. 1990년-현재 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 교수.