

Review on innovative small refrigeration methods for sub-Kelvin cooling

Dohoon Kwon, Junhyuk Bae*, and Sangkwon Jeong

Cryogenic Engineering Laboratory, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea

(Received 28 November 2022; revised or reviewed 27 December 2022; accepted 28 December 2022)

Abstract

Sub-Kelvin cooling has been generally demanded for the fields of low temperature physics, such as physical property measurements, astronomical detection, and quantum computing. The refrigeration system with a small size can be appropriately introduced when the measurement system does not require a high cooling capacity at sub-Kelvin temperature. The dilution refrigerator which is a common method to reach sub-Kelvin, however, must possess a large ^3He circulation equipment at room temperature. As alternatives, a sorption refrigerator and a magnetic refrigerator can be adopted for sub-Kelvin cooling. This paper describes those coolers which have been developed by various research groups. Furthermore, a cold-cycle dilution refrigerator of which the size of the ^3He circulation system is minimized, is also introduced. Subsequently, a new concept of dilution refrigerator is proposed by our group. The suggested cooler can achieve sub-Kelvin temperature with a small size since it does not require any recuperator and turbo-molecular vacuum pump. Its architecture allows the compact configuration to reach sub-Kelvin temperature by integrating the sorption pump and the magnetic refrigerators. Therefore, it may be suitably utilized in the low temperature experiments requiring low cooling capacity.

Keywords: Sub-Kelvin, Dilution refrigerator, Sorption cooler, Magnetic refrigerator

1. 서 론

Sub-Kelvin 온도, 즉 1 K 이하 온도에서의 냉각은 여러 가지 초저온 물리현상 연구를 위해 필수적으로 요구되는 기술이다. 먼저, 극저온 열량계 (calorimeter)를 예로 들 수 있다. 극저온 열량계는 우주 방사선이나 암흑 물질 등 매우 작은 에너지를 가지는 입자 및 광자를 민감하게 감별하는 장치이다. 그러므로, 이러한 목적을 위해서는 매우 작은 에너지로 상당한 크기의 온도 및 전기 저항 등의 변화량을 생성하기 위해서 극저온 냉각이 필요하다 [1]. 이는 비열을 최소화하거나, 초전도체 임계온도에서 급격한 저항의 변화 및 마이스너 효과 (Meissner effect)의 발현 등을 이용하기 위함이다. 양자컴퓨터의 경우에는 큐비트 (qubit)들이 양자 상태를 유지하여 연산을 수행하기 위해서 열적 교란, 기계적 진동, 전자기파 등 외부 노이즈가 제거된 극저온 환경이 필요하다. 특히 초전도 큐비트의 경우 보통 10~20 mK 정도의 매우 낮은 온도가 요구되며 [2], 전자 스핀을 이용한 실리콘 큐비트의 경우도 약 1 K 정도의 온도가 요구된다 [3].

현재까지 1 K 이하 온도를 달성하는 대부분의 냉각 시스템은 희석식 냉동기 (dilution refrigerator)가 사용되고 있다. 희석식 냉동기는 그림 1과 같이 4 K의 예냉을 담당하는 맥동관 냉동기 (pulse-tube refrigerator)와 순차적인 열교환 및 혼합 챔버 (mixing chamber)에서 ^3He 와 ^4He 액체 혼합물의 상분리 (phase separation) 현상을 이용하여 10 mK 정도의 온도를 달성한다. 그림은 건식 (dry) 희석식 냉동기의 개략도를

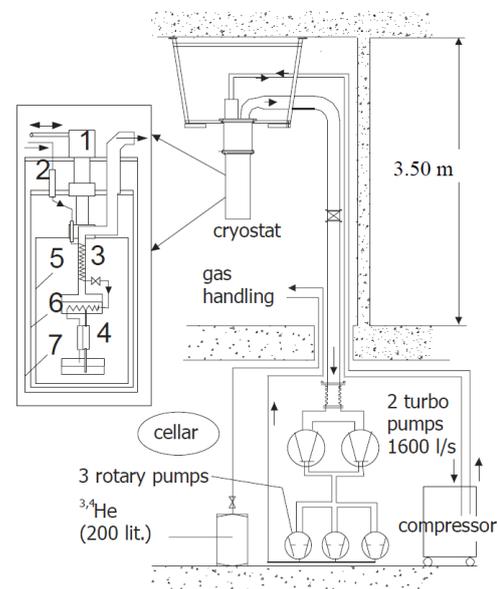


Fig. 1. Schematics of dilution refrigerator [4]. 1) 4 K pulse-tube refrigerator, 2) 3 charcoal trap, 3) J-T circuit, 4) dilution unit, 5) inner vacuum can, 6) radiation shield, 7) outer vacuum can.

나타낸 것으로 [4], 습식 (wet) 냉동기는 4 K 예냉을 극저온 냉동기가 아닌 액체 헬륨을 사용한 경우이다. 희석식 냉동기에서 초유체 ^4He 는 냉각 시스템 내부에서 정제되어 있지만, ^3He 는 내부 유로를 순환하며 증발, 응축 및 ^4He 와의

* Corresponding author: bjh0201@kaist.ac.kr

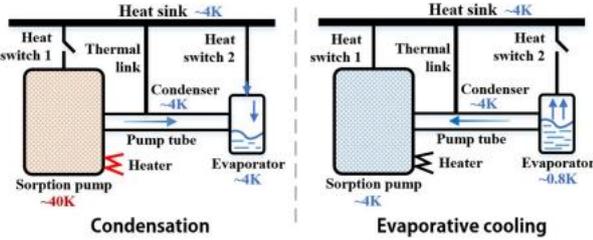


Fig. 2. Schematics of sorption refrigerator [6].

혼합을 반복한다. 이를 위해 터보 펌프와 로터리 펌프로 이루어진 ³He 순환 시스템이 필요함을 그림에서 확인할 수 있다. 일반적으로 희석식 냉동기의 냉각 용량은 ³He의 유량에 비례하기 때문에 [5] 그림과 같은 ³He 순환 방식을 통해 냉각 용량을 증대할 수 있는 장점이 있으나, 상온에 설치된 거대한 순환 시스템으로 인해 냉각 시스템의 크기가 커지는 단점이 있다.

현재 각광받는 미래기술 중 하나인 양자컴퓨터 상용화를 위해서는, 작동하는 큐비트의 수가 많아져야 하고, 그에 따라 요구되는 냉각 용량 또한 증대되기 때문에 냉각 시스템의 대형화가 필요하다. 하지만, 여전히 소형 냉각 시스템이 여러가지 목적에 맞게 요구되기 때문에, 소형 냉각 시스템에 대해서 많은 연구 노력이 필요하다. 첫번째로 페이로드 (pay load)가 중요한 우주 극저온 시스템의 경우, 무게를 최소화하는 동시에 극저온의 온도를 달성하는 소형 냉동 시스템이 반드시 필요하다. 또한, 양자컴퓨터 개발을 위해 수 개의 큐비트를 구성하여 그 거동을 연구하는 경우, 기존의 희석식 냉동기만큼 큰 냉각 용량이 요구되지 않기 때문에 소형 냉동기가 적용될 수 있다. 그에 더해 만약 1 K 이하의 냉각 시스템을 휴대용으로 사용할 수 있을 만큼 소형화가 가능해지면, 기존의 대형 냉각 시스템에 탈-부착하여 냉각 용량의 스케일-업 측면에서 이점이 있을 수 있다.

앞서 알아보았듯이 기존의 희석식 냉동기에서는 큰 부피를 가지는 ³He 순환 시스템이 냉각 시스템 소형화의 장벽으로 존재한다. 따라서 1 K 이하 소형 냉동기를 개발하기 위해서는 1) 거대한 상온 시스템이 필요한 희석식 냉동기가 아닌 다른 방식의 1 K 이하 냉각 시스템을 이용하거나, 2) 기존 희석식 냉동기의 ³He 순환 방식을 변경하여 소형화하는 전략을 도모할 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 1 K 이하 소형 냉각 시스템에 대해 소개하고, 최종적으로 터보 진공 펌프 및 대항류 열교환기가 필요하지 않는 새로운 방식의 소형 희석식 냉동기를 제안한다.

2. 선행 연구

2.1. Sub-Kelvin 흡착식 냉동기

흡착식 냉동기 (sorption cooler)는 액체 상태의 ⁴He 또는 ³He를 매우 낮은 압력으로 증발시켜 극저온에 도달한다. 0.005 mbar (3.75 mTorr) 압력에 해당하는 포화 온도는 ⁴He의 경우 700 mK, ³He의 경우 300 mK이다. 그림 2는 흡착식 냉동기의 개략도를 나타낸 것으로, 흡착식 냉동기는 크게 흡착식 펌프 (sorption pump)와 증발기 (evaporator), 열스위치 (heat

TABLE 1
REFERENCE STUDIES OF SORPTION COOLER.

Method	Heat sink	Lowest Temp. & Hold time	Size
CEA-SBT [7]	1 stage, single-shot 2.5 K ⁴ He tank	258 mK (no load) 70 hours	230 x 100 x 100 mm
Univ. Penn. [8]	2 stage, single-shot 2.7 K PTR	250 mK (no load) 72 hours	³ He sorption pump D = 60 mm
Cardiff Univ. [9]	2 stage, tandem-type 4.2 K PTR	247 mK (no load)	D = 227 mm, H = 130 mm

switch), 히트 싱크 (heat sink)로 구성된다 [6]. 흡착식 펌프는 흡착제가 들어있는 용기이며, 온도를 높이기 위한 히터가 장착된다. 흡착식 펌프의 흡착제로 다공성 탄소 물질인 활성탄을 이용한다. 활성탄은 비표면적이 넓기 때문에 극저온에서 흡착제로 많이 활용된다. 활성탄은 같은 압력에서 온도가 낮으면 기체 분자를 흡착하고 온도가 높으면 탈착하게 된다. 활성탄의 온도를 낮추어 헬륨을 흡착시키면 매우 낮은 압력을 조성하여 액체 헬륨을 증발시킨다. 증발기는 극저온에 도달하게 하는 요소로서, 액체 상태의 ⁴He 또는 ³He가 증발하는 용기이다. 증발기는 흡착식 펌프와 관으로 연결되어 흡착식 펌프의 펌핑 효과를 통해 액체헬륨을 증발하게 한다. 흡착식 냉동기는 다회성으로 동작하기 위해 증발 냉각 과정(evaporative cooling)과 응축 과정(condensation)을 반복한다. 증발 냉각 과정에서는 액체헬륨이 증발기에서 증발하여 목표 온도에 도달하게 하고, 응축 과정에서는 증발 냉각 과정에서 증발된 헬륨을 증발기에서 다시 액화시키는 과정이다. 이러한 과정을 반복하려면 흡착식 펌프와 증발기의 온도를 조절해야 하므로, 증발기와 흡착식 펌프는 각각 열스위치를 통해 4 K 으로 유지되는 히트 싱크와 열적으로 연결된다. 증발 냉각 과정에서 펌핑 작동을 위해서는 열스위치를 통해 히트 싱크에 연결되도록 하여 흡착제의 온도를 낮춘다. 반대로 응축 과정에서 흡착제의 재생을 위해서는 열스위치 연결을 해제하고 히터를 켜서 흡착제의 온도를 높인다.

흡착식 펌프는 자기냉동기와 희석식 냉동기와 비교했을 때, 냉각 효율이 떨어지는 단점을 갖고 있다. 하지만 기계적 동작부가 없이 열적으로 동작하기 때문에 구조가 매우 간단하여 신뢰성이 높고, 소형화가 가능하다. 그리고 자기장이나 기계적 진동이 없기 때문에 볼로미터 (bolometer)를 냉각하는데 탁월한 장점을 가진다. 이러한 장점들로 볼로미터를 사용하는 우주 관측 장치에 사용되었다. 대표적인 흡착식 냉동기의 종류와 사양을 표 1에 나타내었다.

a) single-shot sorption cooler

CEA 그레노블-극저온팀(CEA-SBT)에서는 Herschel 우주망원경의 SPIRE(Spectral and Photometric Imaging Receiver)/PACS(Photo-conductor Array Camera and Spectrometer) 관측기의 볼로미터를 300 mK으로 냉각하기 위해 ³He를 이용한 1단 흡착식 냉동기를 개발하여 그림 3과 같이 탑재하였다. 무부하 온도로 258 mK에 도달하였고, 277 mK에서 냉각 용량 10 μ W 를 달성하였다. 작동 시간 (Hold

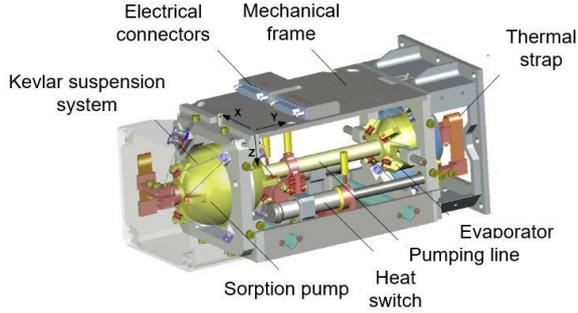


Fig. 3. Sorption refrigerator developed by CEA-SBT [7].

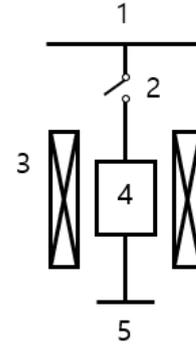


Fig. 6. Schematics of adiabatic demagnetization refrigerator. 1) Heat sink, 2) Heat switch, 3) Magnet, 4) Magnetic material, 5) cooling target.

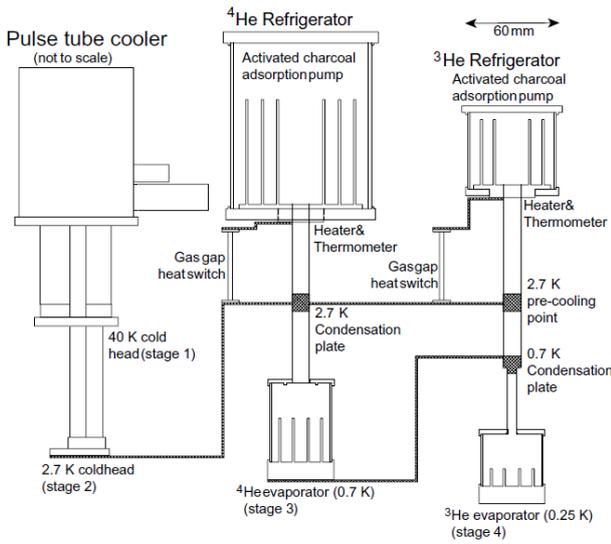


Fig. 4. Two-stage sorption refrigerator developed by Univ. of Pennsylvania [8].

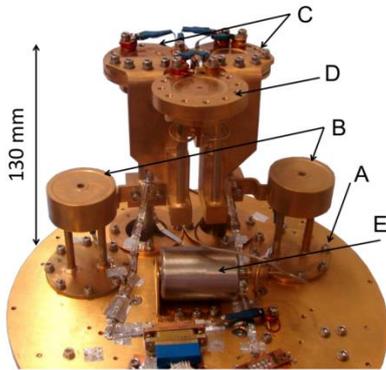


Fig. 5. Tandem-type sorption refrigerator developed by Cardiff University [9], A) 4 K plate, B) ^4He cold head, C) ^3He precooler, D) ^3He cold head, E) expansion tank.

time)은 70 시간, 재생 시간 (recycling time)은 2 시간이고 흡착식 냉동기 유닛의 크기와 무게는 각각 230 x 100 x 100 mm, 1.8 kg이다 [7].

1단 흡착식 냉동기를 발전시킨 2단 흡착식 냉동기 또한 개발된 바 있다. 2단 흡착식 냉동기는 ^4He 흡착식 냉동기와 ^3He 흡착식 냉동기를 연결해서 작동하며, ^4He 흡착식 냉동기가 중간 단계의 온도를 담당하고, ^3He 흡착식 냉동기가 2단 흡착식 냉동기의 최종 목표 온도까지 냉각한다. 이를 통해 2단

흡착식 냉동기는 냉동기에서 발생하는 온도 변동을 줄일 수 있고, 외부 열침입을 중간 단계의 온도에서 ^4He 흡착식 냉동기가 흡수해주기 때문에 더욱 긴 작동 시간을 만들 수 있는 장점을 가진다. University of Pennsylvania 에서는 Green bank 망원경 (GBT)의 검출기를 냉각하기 위해 2단 흡착식 냉동기를 그림 4와 같이 개발하였다. 2.7 K 맥동관 냉동기의 냉각부를 히트 싱크로 활용하여 ^3He 흡착식 냉동기의 증발기에서 무부하 온도로 250 mK을 달성하였다. 286 mK에서 냉각 용량은 $15 \mu\text{W}$ 이고, 작동 시간은 72시간을 달성하였다 [8].

b) tandem-type sorption cooler

흡착식 냉동기는 기본적으로 싱글-샷 (single-shot) 방식으로 동작하기 때문에 재생 시간이 필요하여 목표 온도로 연속적으로 유지하는 것은 불가능하다. 이를 개선하기 위해 2개의 싱글-샷 흡착식 냉동기를 병렬로 연동하여 교대로 동작하는 탠덤형 (tandem type) 흡착식 냉동기가 그림 5와 같이 개발되었다. Cardiff University에서 ^4He 와 ^3He 의 2단 흡착식 냉동기 2 개를 사용하여 무부하 온도로 247 mK에 도달하였고, 365 mK에서 연속적인 냉각 용량으로는 $20 \mu\text{W}$ 를 달성하였다 [9].

2.2. Sub-Kelvin 자기냉동기

자기냉동 (magnetic refrigeration)은 자성 물질 (magnetic material)로 불리는 특정 물질이 자기장 변화에 노출될 때 자기적으로(magnetically) 압축 팽창되어 온도 또는 엔트로피가 변화하는 자기열량효과(magnetocaloric effect)를 이용한 냉각 방식이다 [10]. 희석식 냉동기와 달리 ^3He 등의 유체를 사용하지 않기 때문에 유체의 순환 시스템이 필요하지 않는 대신에 자기장 변화를 생성하는 별도의 자석이 필요하다. 이 때, 발생하는 자기장의 세기를 크게 하는 동시에 자석의 부피를 최소화하기 위해 일반적으로 초전도 자석을 사용하여 시스템의 소형화를 실현한다. 자기 냉동은 기체를 사용하는 압축식 냉동기로 달성하기 힘든 1 K 이하의 극저온을 만들기 위해 개발되어왔으며, 자기장 변화를 통해 냉동 효과를 발생시키기 때문에 기계적인 움직임이 전혀 없는 무진동 시스템을 구현할 수 있다. 또한 자기장 변화에 따른 온도 및 엔트로피 변화 과정은 가역과정이기 때문에 자기냉동은

TABLE 2
REFERENCE STUDIES OF MAGNETIC REFRIGERATOR.

	Method	Magnetic material & Field	Lowest Temp.	Cooling power
NASA [12]	4-stage ADR, continuous	1 st stage : CPA, 0.1 T 2 nd stage : CPA 0.5 T 3 rd stage : CPA, 1.5 T 4 th stage : GdLiF ₄ , 4 T	0.035 K	6 μ W @ 50 mK
CEA [13]	Sorption (0.3 K) +single-stage ADR, one-shot	CPA, 1 T	< 0.05 K	0.4 μ W @ 50 mK
ESA [14]	2-stage ADR, continuous (tandem)	1 st stage : CPA, 2 T 2 nd stage : GGG, 2 T	0.05 K (predicted)	7 μ W @ 100 mK

근본적으로 높은 효율을 가진다. 그림 6은 자기냉동방식 중 하나인 단열탈자냉동기 (adiabatic demagnetization refrigerator, ADR)의 개략도를 나타낸 것이다. 일반적으로 ADR은 열스위치, 자기장 변화를 생성하는 자석, 그리고 자기열량효과를 통해 냉각 용량을 생성하는 자성물질로 이루어진다. 열스위치는 선택적으로 열전달 성능이 변화하는 열전달 기구로, 자성물질이 자화되어 (magnetized) 온도가 상승하면 열 배출부의 열전달을 촉진시킨다. 반면에, 자성물질이 탈자화되면 (demagnetized) 열 배출부와 열전달을 저해하여 단열에 가까운 상태에서 자성 물질의 온도 하강이 이루어지도록 한다. 열스위치는 기계적 접촉의 유무, 초전도 및 자기저항물질의 열전도율 변화 등의 원리를 이용하여 제작할 수 있다 [11].

ADR은 보통 우주에서 X선 검출기와 같은 센서 냉각을 위해 사용되어 왔다. 검출기의 분해능은 센서의 온도와 반비례하기 때문에, 높은 분해능을 가지는 검출기의 냉각을 위해 0.1 K 이하의 온도에서 냉각 용량을 감당할 수 있는 여러 단열탈자냉동기가 제안되어 왔다. 일반적으로 단열탈자냉동기는 액체 헬륨이나 극저온 냉동기를 통해 3~4 K의 온도를 가지는 열배출부 (heat sink)를 가지고 있다. 열배출부 온도에서부터 0.1 K 이하로 온도를 낮추려면, 단일 단계 (single-stage) 단열탈자냉동기를 통해서만 막대한 양의 자성 물질과 매우 높은 자기장을 요구하기 때문에 다단 시스템 (multi-stage system) 또는 하이브리드 시스템을 통해 목표 온도 달성과 시스템의 소형화를 실현했다. 1 K 이하 냉동 시스템의 선행 연구들을 표 2와 같이 정리하였다.

a) 4-stage continuous ADR

Constellation-X mission에서 X선 검출기 냉각을 위해 50

mK 온도 달성이 가능한 4단 CADR (continuous ADR)이 NASA (National Aeronautics and Space Administration)에 의해 제안되었다 [12]. 그림 7과 같이 첫번째 단계는 일정 온도를 유지하여 검출기에서 발생하는 열을 흡수하고, 그 위의 2~4번째 단계에서는 검출기의 열을 열배출부로 다단 형식을 통해 전달한다. 1~3번째 단계는 자성물질로 CPA (chrome potassium alum)가 사용되었으며 4번째 단계에서는 상대적으로 높은 온도 영역에서 자기열량효과가 큰 GdLiF₄가 사용되었다. 4.2 K의 액체 헬륨 수조를 통한 프로토타입 실험 결과 최저 35 mK의 온도를 달성하였고, 50 mK에서 6 μ W의 냉각 용량을 달성하였다. SiFe를 수동적 자기 차폐체로 각 단계 설치하여 자석에서 나오는 자기장을 차폐하였다.

b) Sorption/ADR hybrid

CEA (French Alternative Energies and Atomic Energy Commission)에서는 SAFARI (SpicA FAR-infrared Instrument)를 위한 50 mK 냉동기로서, 흡착식 냉동기와 단열탈자냉동기의 하이브리드 시스템을 제안하였다 [13]. 그림 8과 같이 ³He, ⁴He를 통해 각각 1.8 K 및 4.9 K 열배출부를 제공하고, 흡착 펌프를 통한 ³He의 증발 냉동 방식(evaporative cooling)을 통해 0.3 K, 단일 단계 ADR을 통해 싱글-샷 방식으로 50 mK에서 냉각 용량을 만들어낸다. 프로토타입 실험 결과 냉각 부하는 50 mK에서 약 0.4 μ W로, 270 g의 CPA를 1 T의 자기장 변화에 노출시켜 냉각 부하를 감당한다. 냉동 시간은 24시간, 재생 시간은 8시간으로, 75%의 duty cycle을 달성하였다. 흡착 펌프는 가열 과정에서 최대 30 K 까지 온도가 상승하게 된다.

c) 2-stage continuous tandem ADR

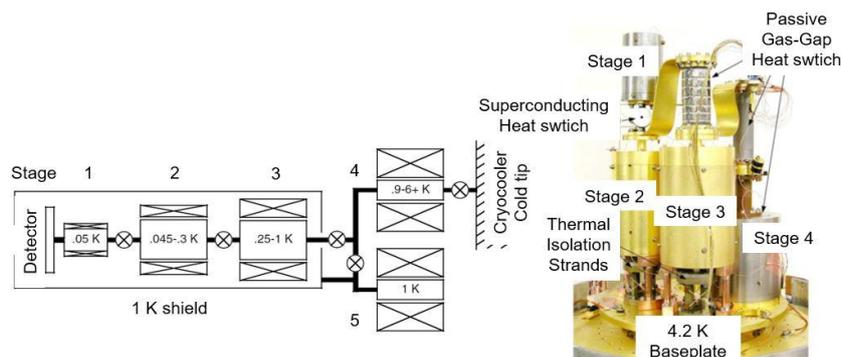


Fig. 7. 4-stage ADR developed by NASA [12].

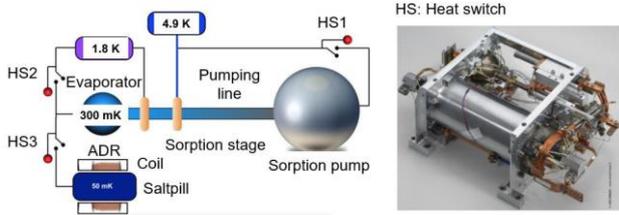


Fig. 8. Hybrid ADR developed by CEA [13].

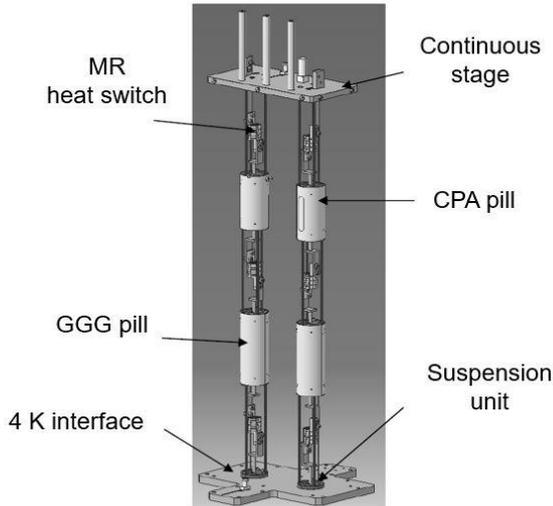


Fig. 9. Tandem-type two-stage ADR developed by ESA [14].

ESA (European Space Agency)에서는 그림 9와 같이 탠덤 형태로 두개의 ADR을 병렬 연결한 2단 CADR 시스템을 제안하였다 [14]. 4 K 열배출부는 액체 헬륨이나 상용 냉동기로 이루어져 있으며, 2단 ADR을 통해 0.1 K이하의 온도를 도달하는 것을 목표로 하였다. 2단부는 자성물질로 GGG(gadolinium gallium garnet)가 133 g이 사용되며 2 T의 자기장 변화에 노출되고, 1단부는 CPA가 22 g이 사용되어 2 T의 자기장 변화에 노출된다. 계산을 통한 예측 결과 100 mK에서 7 μ W의 냉각용량을 달성함을 확인하였다.

2.3. Cold-cycle 희석식 냉동기 선행 연구

앞서 설명하였듯이, 희석식 냉동기에서는 터보 및 로터리 펌프로 구성된 ^3He 순환 시스템이 상온에 위치하여 상당한 부피를 차지한다. Cold-cycle 희석식 냉동기는 이러한 단점을 보완하여 ^3He 순환 시스템을 극저온 환경에 설치한 것으로, ^3He 의 응축이나 흡착을 이용해 ^3He 을 순환시킨다. 이러한 방법은 기계적 방식의 펌프를 이용한 순환 시스템에 비해서 일반적으로 ^3He 의 유량이 작기 때문에 냉각 용량이 크게

TABLE 3
REFERENCE STUDIES OF COLD-CYCLE DILUTION REFRIGERATOR.

	Method	Mass flow rate	Lowest Temp.	Cooling power
[15]	Condensation pump	15 $\mu\text{mol/s}$	57 mK	7 μW @ 100 mK
[16]	Sorption pump	75 $\mu\text{mol/s}$	8 mK	60 μW @ 110 mK

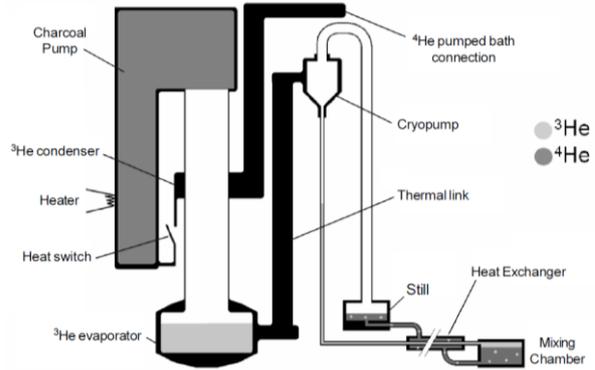


Fig. 10. Cold-cycle dilution refrigerator with condensation pump. (a) Schematics of the cooler and (b) the photograph of the pump [15]. Fin structure is installed to enhance the heat transfer.

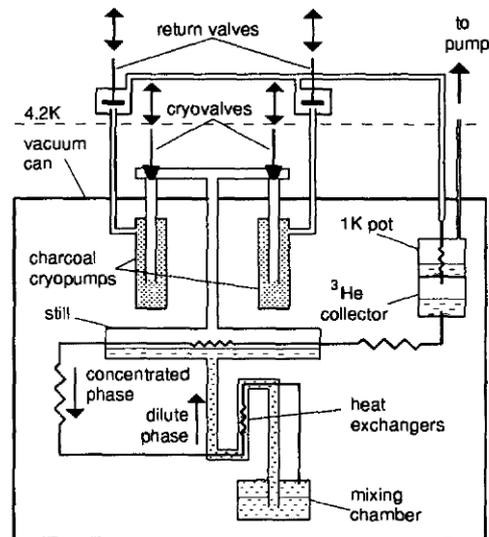


Fig. 11. Schematics of the cold-cycle dilution refrigerator with sorption pump [16]. This ‘wet’ dilution refrigerator utilizes liquid helium as a heat sink and has additional 1 K stage for precooling the ^3He .

필요하지 않는 소형 시스템에 적합하다. 즉, ^3He 순환 시스템의 변경을 통한 시스템의 소형화와, 그에 따라 값이 비싼 ^3He 의 사용량을 저감할 수 있고, 기계적 순환 방식을 대체함으로써 무진동 시스템 구성이 가능해지는 등 많은 장점을 가지게 된다.

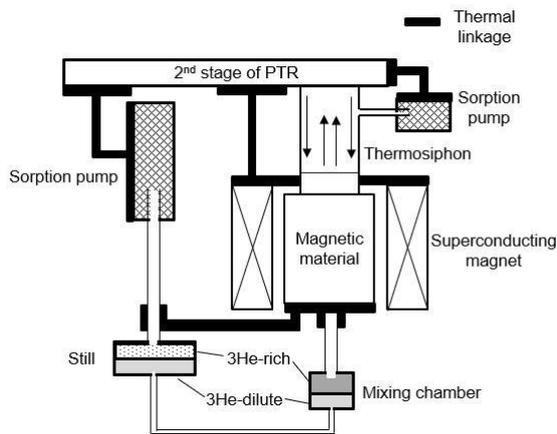


Fig. 12. Schematics of proposed dilution refrigerator.

표 3에는 cold-cycle 방식으로 구현한 희석식 냉동기 선행 연구들이 정리 되어있다.

a) Condensation pump

응축 펌프 (Condensation pump)는 ^3He 를 응축시켜서 0.7 K 정도의 증류기 (Still)에서 증발하는 ^3He 와의 증기압 차이와, 액체 ^3He 가 증력에 의해 이동하는 원리를 이용한 순환 방식이다. 일반적으로 응축 펌프는 흡착식 냉동기 등 별도의 냉동기를 통해 약 0.3 K 정도로 냉각된다. 그림 10은 응축 펌프를 이용한 cold-cycle 희석식 냉동기의 개략도를 나타낸 것이다 [15]. 이 시스템에는 펌프 냉각을 위해 360 mK에서 500 μW 의 냉각용량을 가지는 단일 ^3He 흡착식 냉동기가 사용되었다. 좀 더 상세한 내용으로는, 펌프를 구성하는 고체 구리 부분과, 내부 ^3He 사이의 온도 차이를 최소화하기 위해, 핀 구조가 적용되었음을 알 수 있다. 응축 펌프를 이용하여, 15 $\mu\text{mol/s}$ 의 ^3He 유량을 달성하였으며, 최저 도달 온도 57 mK 및 100 mK에서 7 μW 의 냉각용량을 달성하였다.

b) Sorption pump

앞서 설명한 흡착의 특성을 이용한 흡착 펌프를 통해 증류기에서 증발한 ^3He 를 펌프에 흡착시키고, 흡착제를 가열하여 ^3He 를 가압시킨 후, 다시 희석식 냉동기로 ^3He 를 공급할 수 있다. 그림 11이 이러한 흡착 펌프를 사용한 cold-cycle 희석식 냉동기의 개략도를 나타낸다 [16]. 두 개의 흡착 펌프가 병렬로 사용되며, 하나의 펌프가 흡착을 할 때 나머지 펌프는 탈착하여 연속적인 ^3He 의 순환을 만들어낸다. 이 때, ^3He 의 순환이 한 방향으로 이루어지도록 극저온 벨브 (cryovalve)가 적용된 것을 확인할 수 있다. 흡착 펌프를 이용하여, 75 $\mu\text{mol/s}$ 의 ^3He 유량을 달성하였으며, 최저 도달 온도 8 mK 및 110 mK에서 60 μW 의 냉각용량을 달성하였다.

3. 신개념 희석식 냉동기 제안

희석식 냉동기에서는 ^3He 순환을 위한 터보 진공 펌프와 열교환 효율이 매우 좋은 대향류(recuperative) 열교환기가 핵심적인 구성요소이다. 하지만 터보 펌프의 경우 국내 제작

기술이 전무한 상황으로 전적으로 수입에 의존한 실정이다. 또한 열교환기의 경우 낮은 온도에서 발생하는 카피자 (Kapitza) 열저항으로 인해 열교환기 내부의 열전달 면적을 극대화해야 하며, 이로 인해 제작 난이도가 매우 높다. 따라서, 터보 펌프를 이용한 ^3He 의 순환 방식과, 고효율 열교환기 제작이 희석식 냉동기 개발에 있어 큰 장애물로 존재한다.

KAIST 저온공학 연구실에서는 이러한 문제점을 타개하기 위해, 새로운 방식의 소형 희석식 냉동기를 그림 12와 같이 제안하였다. 제안된 냉동기는 ^3He 펌핑을 위한 흡착식 펌프 및 ^3He - ^4He 혼합물 액화를 위한 자기냉동기로 구성되어 있으며, 싱글-샷 방식으로 작동하는 대신 열교환기가 필요하지 않는 형태를 가지고 있다. 신개념 소형 희석식 냉동기의 작동 시나리오는 다음과 같다.

- 1) 극저온 냉동기를 활용하여 모든 시스템을 상온에서부터 4 K까지 완전 냉각시킨다.
- 2) 흡착식 펌프는 히터를 통해 가열된 상태를 유지하여 헬륨의 흡착을 방지한다.
- 3) 자기냉동기를 작동시켜, 희석식 냉동기 유닛 내부에 있는 ^3He - ^4He 혼합물을 약 0.5 K으로 액화시킨다. 자기냉동기를 반복적으로 작동하면 증류기 및 혼합 챔버에 ^3He - ^4He 혼합물의 액체가 형성되며, ^3He - ^4He 액체 혼합물의 상분리가 일어난 상태로 유지된다.
- 4) 헬륨 혼합물이 충분히 생성되면 희석식 냉동기를 작동시킨다. 증류기에 설치된 히터를 통해 증류기 온도를 0.7~0.8 K으로 유지하여 ^3He 증기압을 상승 시킨다. 그와 동시에, 흡착식 펌프의 히터를 끄고 온도를 하강시켜서 ^3He 의 흡착을 유도한다.
- 5) ^3He 이 증류기에서 흡착식 펌프로 이동하면, ^3He 의 평형을 맞추기 위해 혼합 챔버 내부에 있던 ^3He 가 증류기 쪽으로 이동하며, 이 때 혼합 챔버에서 냉각 효과가 발생한다.
- 6) 혼합 챔버 내부에 ^3He 가 고갈되면 희석식 냉동기 작동을 멈추며, 다시 2)번 과정부터 반복하여 헬륨 혼합물을 액화하고 흡착 펌프 내부의 ^3He 를 탈착시키는 재생 시간을 가진다.

앞선 선행연구들을 통해 살펴보았듯이, 자기냉동기는 좁은 온도범위에서는 냉동 효율이 높고 ^3He 과 ^4He 의 분리가 일어나는 0.85 K 이하의 낮은 온도를 매우 용이하게 달성할 수 있으며, 흡착식 펌프와 마찬가지로, 기계적 작동부가 없으므로 무진동 특성과 높은 신뢰성을 가진다. 흡착식 펌프는 기존의 터보 진공 펌프에서 터보 블레이드가 기계적으로 회전하며 진공 배기하는 방식과 달리, 활성탄 등의 흡착제에 기체가 흡착되는 현상을 이용한 열적인 진공 배기 방식으로, 기계적 작동부가 없기 때문에 무진동 특성과 높은 신뢰성을 가진다는 장점이 있다. 따라서, 이러한 장점들을 바탕으로 새로운 방식의 소형 희석식 냉동기를 효과적으로 제작할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결 론

본 논문에서는 1 K 이하 온도 달성을 위한 소형 냉각 시스템으로 적용가능한 여러가지 냉각 시스템에 대해 살펴보았다. 기존의 희석식 냉동기에서 ^3He 순환을 위한 터보

및 로터리 펌프 장치가 시스템의 대형화를 야기하였기 때문에, 거대한 상온 시스템이 필요한 희석식 냉동기가 아닌 다른 방식의 냉각 시스템을 통해 소형화를 이룰 수 있다. 따라서, 흡착식 및 자기냉동기는 희석식 냉동기의 대안이 될 수 있으며 선행 연구들을 정리하였다. 또한, 기존 희석식 냉동기의 ^3He 순환 방식을 변경하여 소형화하는 전략을 도모할 수 있으며, 이러한 cold-cycle 희석식 냉동기에 대한 선행 연구들도 정리하였다. 이에 더하여, 본 논문은 신개념 소형 희석식 냉동기를 제안하였으며, 그 목적은 1 K 이하의 초저온을 달성하는 무진동-소형 냉동 시스템을 실현하는 것이다. 신개념 소형 희석식 냉동기는 ^3He 순환을 위한 흡착식 펌프 및 ^3He - ^4He 혼합물 액화를 위한 자기냉동기로 구성되어 있으며, 터보 펌프 및 열교환기가 필요하지 않는 대신 싱글-샷 및 무진동으로 작동하는 특성을 가진다. 무진동 특성은 열적 교란 및 기계적 진동에 매우 민감한 양자 큐비트나, 초저온 열량계 등의 냉각에 필수적이다. 제안된 소형 냉각 시스템은 냉각 용량이 크게 필요하지 않는 초저온 물리 연구 상황에서 적절하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT).(NRF-2022R1A2C2091842)

REFERENCES

- [1] K. Pretzl, "Cryogenic calorimeters in astro and particle physics," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 454, no. 1, pp. 114-127, 2000.
- [2] S. Krinner, S. Storz, P. Kurpiers, P. Magnard, J. Heinsoo, R. Keller, et al., "Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems," *EPJ Quantum Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 2, 2019.
- [3] K. Ono, T. Mori, and S. Moriyama, "High-temperature operation of a silicon qubit," *Scientific reports*, vol. 9, no. 1 pp. 1-8, 2019.
- [4] K. Uhlig, "Dry dilution refrigerator with high cooling power," *AIP Conference Proceedings*, vol. 985, no. 1, pp. 1287-1291, American Institute of Physics, 2008.
- [5] A. T. A. M. De Waele, "Basic operation of cryocoolers and related thermal machines," *Journal of Low Temperature Physics*, vol. 164, no. 5, pp. 179-236, 2011.
- [6] Xiaotong Xi, Jue Wang, Loubiao Chen, Yuan Zhou, and Junjie Wang, "Progress and Challenges of Sub-Kelvin Sorption Cooler and Its Prospects for Space Application," *Journal of Low Temperature Physics*, vol. 199, pp. 1363-1381, 2020.
- [7] L. Duband, L. Clerc, E. Ercolani, L. Guillemet, and R. Vallcorba, "Herschel flight models sorption coolers," *Cryogenics*, vol. 48, pp. 95-105, 2008.
- [8] M. J. Devlin, S. R. Dicker, J. Klein, and M. P. Supanich, "A high capacity completely closed-cycle 250 mK ^3He refrigeration system based on a pulse tube cooler," *Cryogenics*, vol. 44, pp. 611-616, 2004.
- [9] G. M. Klemencic, P. A. R. Ade, S. Chase, R. Sudiwala, and A. L. Woodcraft, "A continuous dry 300 mK cooler for THz sensing applications," *Review of Scientific Instruments*, vol. 87, pp. 045107, 2016.
- [10] S. K. Jeong, "Magnetic refrigeration," *The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, vol. 24, no. 3, pp. 271-282, 1995.
- [11] Q. S. Shu, J. A. Demko, and J. E. Fesmire, "Heat switch technology for cryogenic thermal management," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 278, no. 1, pp. 012133, IOP Publishing, 2017.
- [12] P. Shirron, E. Canavan, M. DiPirro, J. Francis, M. Jackson, et al., "Development of a cryogen-free continuous ADR for the constellation-X mission," *Cryogenics*, vol. 44, no. 6-8, pp. 581-588, 2004.
- [13] J. M. Duval, L. Duband, and E. A. Attard, "Qualification campaign of the 50 mK hybrid sorption-adr cooler for spica/safari," *IOP conference series: materials science and engineering*, vol. 101, no. 1, pp. 012010, IOP Publishing, 2015.
- [14] J. Bartlett, G. Hardy, I. Hepburn, S. Milward, P. Coker, and C. Theobald, "Millikelvin cryocooler for space-and ground-based detector systems," *Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI*, vol. 8452, pp. 484-499, SPIE, 2012.
- [15] T. Prouvé, N. Luchier, and L. Duband, "Pocket dilution cooler," *Proc. of 15th ICC*, 2008.
- [16] P. Mohandas, B. P. Cowan, J. Saunders, V. K. Chagovets, V. N. Lukashov, V. A. Maidanov, et al., "Continuously operating cryogenic cycle dilution refrigerator," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 194, pp. 55-56, 1994.