

He³-He⁴ 희석냉동기의 제작

김동락, 이형철, 김양수, 도철진.
기초과학지원연구소 고자장극저온그룹

1. 서론

³He-⁴He 희석냉동기(Dilution Refrigerator)는 1K~수mK 온도영역에서 연속적인 큰 냉각능력을 가지고 있는 극·초저온 분야의 연구를 위한 냉각수단으로 유일하게 사용되는 기기이며, 이를 이용한 극저온에서의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 실제로 물리학에서의 주요한 관심사 중의 하나인 응집계(condensed matter)에서의 양자현상이나 미세구조에서의 새로운 현상들이 ~100~10 mK 부근에서 두드러지게 나타난다. 또한 보다 더 근본적인 물리현상의 이해를 위해서 절대온도 0K에 접근한 온도영역에서의 실험이 요구되고 있다. 이와 같이 극저온의 발생은 물성연구에 있어서 중요하며 산업적으로도 그 기술의 응용이 다방면에 이용된다.

본 연구에서는 ³He 순환량 500μmole/sec, 도달온도 5mK 이하를 목표로 하여 비교적 큰 규모의 희석냉동기의 개발과 궁극적으로 자기냉동법(magnetic cooling)을 통한 초저온 온도영역에 도달하기 위한 제반환경을 조성하고자 한다.

2. 희석냉동기의 원리

³He와 ⁴He의 혼합액은 저온에서 특이한 성질을 보인다. 이 혼합액은 3중임계점(Three-critical point, 0.86K) 이하에서는 ³He 농축상(concentrated phase)과 ³He 희박상(dilute phase)의 2상 분리가 일어나며 약 40mK 이하가 되면 ³He 농축상은 거의 순수한 ³He으로, ³He 희박상에는 ³He가 6.4% 포함되어 있다. ³He 농축상은 ³He 희박상보다 가벼우므로 위로 뜨고, 뚜렷한 상분리면이 생긴다.(그림 -1)

희석냉동기는 ³He-⁴He 혼합액이 저온에서 보이는 이런 특이한 성질을 이용하는 냉각장치이다. 희박상 중의 ³He이 Fermi 기체인 것에 비하여 농축상은 거의 순수한 액체 ³He이므로, 고전적인 단열증발과 비교할 때 그 상분리한 계는, 농축상은 고전적인 단열증발에 의한 액체 상에, 희박상은 포화증기상에 대응하며 역학적 진공(mechanical vacuum)으로 생각해도 좋다. 따라서 이 방법은 고전적인 단열증발법을 Fermi 기체에 응용한 것이라고 할 수 있다. 희석냉동기에서 ³He 입자는 농축상에서 희박상으로 상분리면을 통하여 아래쪽을 향하여 이동하여 확산할 때의 증발잠열에 의해서 냉각이 이루어진다.

³He을 농축상에서 상분리면을 통하여 희박상으로 증발시키기 위해서는 희박상의 ³He을 진공펌프에 의해 외부로 배기하는 ³He 순환방식으로, 희박상에서 배기한 ³He을 농축상으로 되돌림으로서 연속운전이 가능하다.

희석냉동기 본체의 주요 구성은 분류기(Still), 혼합실(Mixing Chamber), 열 교환기(Heat Exchanger)로 되어 있다.(그림-2) 희석냉동기가 정상상태에 도달하면 혼합실의 온도가 일정치 T_M이 된다. 취급하기 쉽게하기 위해서, ³He 만이 순환한다고 가정하고, 또 마찰열은 발생하지 않는다고 생각하여 냉각능력과 최저 도달 온도를 계산하여 본다.

외부로부터의 열침입 \dot{Q} 와 액체 ³He을 따라 들어오는 열량에 의해 혼합실의 온도는 상승한다. 이 액체 ³He은 최종 step의 열교환기를 나올때의 온도 T_H로 혼합실에 들어와 혼합실의 온도 T_M까지 냉각된다. 따라서 평형상태에서 냉각능력 \dot{Q} 는

$$\dot{Q} = \dot{n}_3(94.5T_M^2 - 12.5T_H^2) \quad //mole \quad (1)$$

이 된다. 식 (1)에서 T_H의 \dot{n}_3 의존성을 무시할 때 냉각능력은 ³He의 순환속도 \dot{n}_3 에 비례한다. 지금 1-shot형의 냉동기를 생각하고, 열교환이 완전히 행하여 지는 경우, 즉 T_M = T_H 일때를 생각하면

$$\dot{Q} = 82\dot{n}_3 T_M^2 \quad //mole \quad (2)$$

가 된다.

3. 희석냉동기의 설계 및 제작

- 혼합실

혼합실에서는 ^3He - ^4He 혼합액이 상분리에 의하여 냉각효과가 일어나는, 희석냉동기에 있어서 최저온부이다. 본 연구에서 제작된 혼합실의 체적은 약 82c.c.이며 혼합실 자체는 무산소동으로 제작하였다.

- 분류기

^3He 의 순환량은 분류기의 온도, 즉 증발한 ^3He 가스의 포화증기압과 배관을 포함한 배기계의 배기능력에 의해 결정된다. 분류기의 온도는 heater로서 0.6~0.8K를 유지하여 필요로 하는 순환량을 조절한다.

분류기에서는, 혼합실에서의 ^3He 의 희석속도에 대응하는 량으로서 ^3He 의 증발속도가 중요하다. ^3He 의 증발속도는 액체중에서 기체중으로 증발하는 ^3He 의 mole수에 비례하며, 본 연구에서 제작한 분류기는 123cm²의 단면적을 가진다.

- 열교환기

열교환기의 제작에 있어서 ^3He 과 경계면과의 Kapitza저항, 점성발열 등을 고려하여 온도영역에 따른 열교환기의 형태를 궁리할 필요가 있다.

0.6K~0.1K의 온도영역에서는 연속형의 tube-in-tube 방식의 2중관 형식의 열교환기를, 저온부에서는 sintercd silver step heat exchanger를 사용한다.

- 1K Pot

1K Pot는 외부의 배기펌프로 감압하여 1.3~1.5K의 온도를 유지하도록 되어있으며 위로부터의 열유입을 줄이고, 또한 순환되는 ^3He gas를 응축하여 액체로 만드는 역할을 한다.

4. 결론

본 연구과제에서는 극저온에서의 물성연구를 위하여 ^3He 순환량 500 $\mu\text{molc/sec}$, 100mK에서 400 μW 이상의 냉각능력과 5mK 이하의 도달온도를 목표로 하는 희석냉동기를 설계하였다.

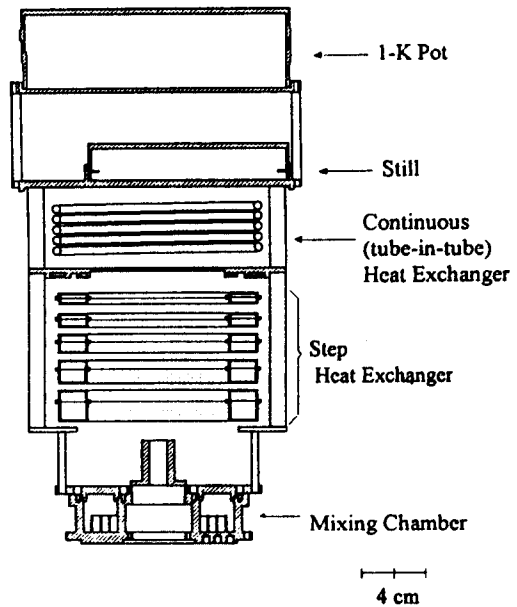
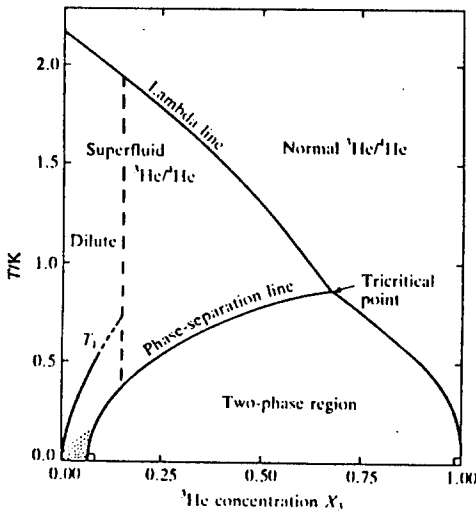


Fig. 1. Phase Diagram of ^3He - ^4He Mixture, Fig. 2. Main parts of Dilution Refrigerator.