

## 1 K 이하의 냉각기술

김동락  
한국기초과학지원연구원

### 1. 서 론

저온에서의 물성연구는 계의 엔트로피를 낮춤으로서 물질의 내재적인 성질을 이해하는데 큰 기여를 하고 있다. 현재에는  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  희석냉동기를 이용하여 약 10mK 정도의 저온 영역에서의 물성연구가 세계 곳곳에서 행하여지고 있으며, 일부 연구실에서는 Nuclear Magnetic Cooling을 하여  $\sim\mu\text{K}$  이하의 극한온도 영역에서도 물성연구를 하고 있다. 저온에서는 열운동으로 인해 관측되지 않았던 물질의 특성이 현저하게 나타나며, 초유동현상, 초전도, Fractional Quantum Hall Effect, Macroscopic Quantum Tunneling, 저차원 도체에서 전자의 국소화 등 고체물리학의 기초에 관계되는 문제가 많이 있다. 오늘날 인간이 경험할 수 있는 온도로서는 물질을  $8 \times 10^{-10}$  K (은(Ag)의 원자핵의 온도)까지 냉각 할 수 있으며, 또한  $10^8$  K (토카마크형 핵융합로 안에서의 플라즈마의 온도) 까지 가열할 수 있다.  $10^{19}$  배 이상이나 틀리는 이 양 극단의 온도의 차이 - 이와 함께 새로운 기술의 진보에 의해 이 양 극단의 차이는 커져만 간다 - 와 비교해 볼 적에 일상생활이나 일반적인 실험실에서 경험할 수 있는 온도영역은 참으로 좁은 온도 범위에 제한되어 있다. 이러한 엄청나게 넓은 달성 가능한 범위 내에서 온도를 변화시킬 때, 모든 물질의 성질이 현저하게 바뀌어 진다는 것은 다만 놀라울 따름이다. 이 변화의 대부분은 기초물리학 뿐만이 아니라 실용적인 응용면에서 보더라도 깊은 의미를 가지고 있다. 이것은, 실온보다 낮은 온도와 실온보다 높은 온도에 대해서도 마찬가지이다.

저온기술의 발전에 의하여 소형 단열소자냉동기(adiabatic demagnetisation refrigerators, ADR)와 폐회로  $^3\text{He}$ 냉동기 및  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  희

석냉동기(dilution refrigerator) 로서 0.1 K 온도영역을 비교적 손쉽게 얻을 수 있게 되었다. 이러한 극저온 냉각시스템은 물성연구, SQUID, STJ, TES, 중력파검출기, Quantum Device, 천문우주 등의 분야에서 활용되고 있으며 앞으로 수요가 점차 증가할 것이다. 대체로 1 K 이하의 온도를 얻기 위한 냉각장치는  $\sim 1$  K 온도영역에 도달하기 위한 예비냉각장치가 필요하다. 가장 일반적으로는 액체헬륨을 사용하여 4.2K를 얻거나, 펌프를 이용하여 감압함으로써  $\sim 1$  K에 도달할 수 있다.

또한 최근 GM 냉동기, Pulse Tube 냉동기 등 소형냉동기 기술의 발전으로 4K 온도영역은 쉽게 도달할 수 있으므로, 소형냉동기 + J-T 냉각 또는 소형냉동기 + 자기냉각으로서  $\sim 1$  K 온도영역에 도달할 수 있다.

### 2. 헬륨의 성질

헬륨의 두 동위원소  $^3\text{He}$  과  $^4\text{He}$  는 포화증기압 하에서 절대영도까지 액체로 남아있다. 이들은 양자액체(Quantum Fluid)라고 불리며 여러가지 특이한 움직임을 보인다. 헬륨은 1908년 네델란드의 Kamerlingh-Onnes에 의해 처음으로 액화 된 이후로 한체(cryogen)로서 광범위하게 이용됨과 더불어 그 물리적 성질이 상세하게 연구되어 왔다. 액체헬륨은 원자가 가볍고 원자간 상호작용이 아주 적은 점등으로 부터 보통의 액체와 다른 몇 가지 특이한 성질을 가지고 있는 것이 알려져 있다.

헬륨기체는 4.2K에서 액체로 되며, 액체헬륨의 성질은 2.172K를 기준으로 이 온도보다 위의 액체상태를 헬륨-I(He-I), 아래의 액체상태를 헬륨-II(He-II)라고 구별하여 부른다. 헬륨은 다른 액체와 달리 포화증기압하에서는 아무리 온도를 낮추어도 고체로 되지

않는다. 따라서 기체, 액체, 고체의 공존점(삼중점)이 없다. 이것은 헬륨-II가 액체이면서 entropy가 낮고 고체에 상당하는 규칙성(ordered state)을 가지고 있는 액체라고 생각된다.  $^4\text{He}$ 의 상(phase)을 그림 1에 보인다.

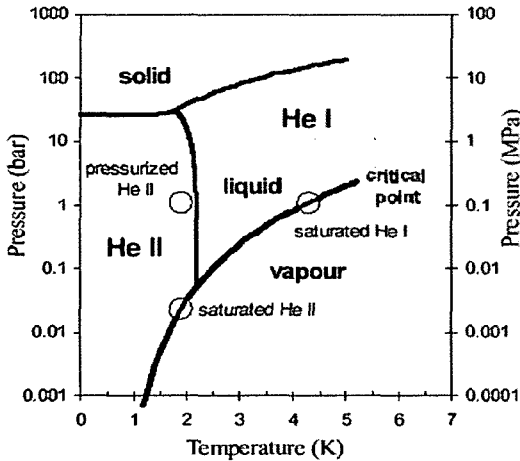


그림 1. 헬륨( $^4\text{He}$ )의 상 그림

액체헬륨의 증발가스를 진공펌프로 배기하면 증발에 의해 잠열(latent heat)이 빼앗기게 되므로 액체헬륨의 온도는 끓는 점인 4.2K 이하로 낮아진다. 그러나 이 방법으로 도달할 수 있는 이제까지의 최저 온도는 0.7K 정도이다. 이것은 액체헬륨은 람다점인 2.17K 보다 저온에서는 초유동상태로 되어 액체가 벽면을 타고 오르는 film flow 현상이 일어나 액체헬륨의 표면적이 대단히 넓어지게 되어 증발시키는 것이 어렵게 되기 때문에 1K 이하의 저온을 얻기가 매우 어렵다.

그러나 이것은  $^4\text{He}$ 에 대한 것으로서, 이러한 온도영역에서 초유동을 보이지 않는  $^3\text{He}$ 을 이용하면 진공펌프의 배기에 의해서 거의 0.3 K까지 도달할 수가 있다.

### 3. $^3\text{He}$ 냉각

액체  $^3\text{He}$ 을 배기 하여 감압하면 0.3K까지의 저온을 얻을 수 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 같은 온도에서의 헬륨의 증기압은  $^4\text{He}$ 보다  $^3\text{He}$ 이 훨씬 크며,  $^3\text{He}$ 의 경우에는 초유동  $^4\text{He}$ 에서와 같은 film flow에 의한 손실이 없는 등 이점이 있다.  $^3\text{He}$ 의 증발잠

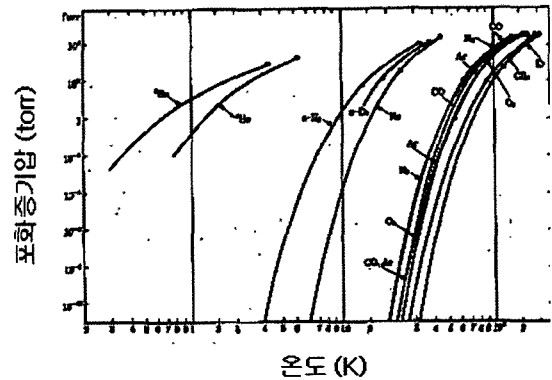


그림 2.  $^4\text{He}$ 와  $^3\text{He}$ 의 증기압

열은  $^4\text{He}$ 의 약 1/3이지만, 비열은 1K 이하에서  $^3\text{He}$ 가 크다. 이  $^3\text{He}$ 의 비열은 Cryostat에 통상 사용되는 재료의 비열과 비교할 때  $^3\text{He}$ 가 훨씬 크다. 주로 사용되는 금속경우 1K에서 enthalpy는  $10^{-6}\text{J/g}$  정도이다. (예: Cu-  $6 \times 10^{-6}\text{J/g}$ , Au-  $3 \times 10^{-6}\text{J/g}$ , Al-  $25 \times 10^{-6}\text{J/g}$ ) 따라서 대부분의 금속은 1K정도까지 냉각되어 있으면 그 이하로 냉각하기 쉽다.

$^3\text{He}$  cryostat 는 연속운전형(circulation type)과 비연속운전형(single shot type)이 있다. 후자의 경우 지속시간은 보통 3~30시간이다. 이 형태의  $^3\text{He}$  cryostat의 원리적인 구성을 그림 3에 보인다.

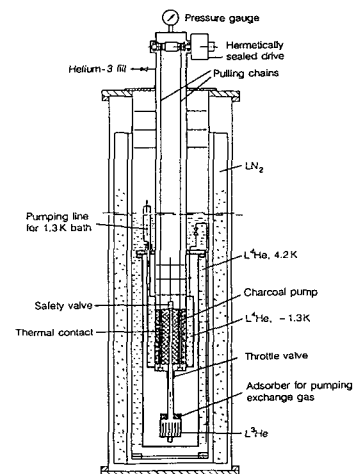


그림 3.  $^3\text{He}$  cryostat 의 원리적인 구성

약 1.2K 까지 온도가 낮춰진 액체  $^4\text{He}$  안의 단열 진공상자 속에 든  $^3\text{He}$ 용기가 들어 있다. 먼저 단열진공의 공간에 열교환용의

$^4\text{He}$ 가스를 0.1~1 Torr정도 넣어둔 뒤, 배기관을 통해  $^3\text{He}$  가스를 액화시키면서 필요량의 액체  $^3\text{He}$ 을 용기에 모은다. 그 뒤 관을 통해 열교환가스를  $1 \times 10^{-6}$  Torr 이하 배기하여, 증기압을 낮추면 용기의 온도가 낮아진다. 배기에 의해  $^3\text{He}$ 이 증발할 때, 남아 있는 액체  $^3\text{He}$ 으로부터 증발잠열을 빼앗는다. 배기에 의한 냉동능력  $\dot{Q}$ 는

$$\dot{Q} = \dot{n}(T) \cdot \gamma(T)$$

이다. 여기에서 증발잠열  $\gamma(T)$ 의 온도의존성은 비교적 적으나, 배기량  $\dot{n}$ 은 증기압 곡선에 대응하여 온도강하와 더불어 급속히 감소하기 때문에, 냉동능력  $\dot{Q}$ 는 거의 온도의 지수함수로 낮아진다. 증기압을 낮추기 위해서는 유크산펌프 또는 더 큰 냉동능력과 낮은 온도를 얻기 위해서는 흡착펌프(활성탄 또는 제오라이트)를 사용한다.

연속 운전형  $^3\text{He}$  cryostat는 배기한  $^3\text{He}$ 을 다시 응축시켜  $^3\text{He}$ 용기로 돌려 보내는 방식으로,  $^3\text{He}$  가스를 순환시키는 배기계와 정제장치 등 일련의 외부 시스템이 필요하다.

#### 4. 자기냉각

자기냉각은 단열소자(斷熱消磁)냉각이라고도 한다 (Adiabatic Demagnetization Refrigeration : ADR). 액체헬륨 등의 한체(cryogen)을 사용하지 않고 냉각할 수 있는 1K 이하의 온도에 도달하는 방법은 없을까? 이것은 가격이 비싼 액체헬륨으로 실험을 해 본 연구자들은 누구나 생각하여 보았을 것이다. 이에 대해서는 이미 1932년 이후 사용되어 온 방법으로서 상자성화합물을 이용한 전자스핀에 의한 단열소자법이 있다. 이 방법으로는 FAA(Ferrous Ammonium Alum)등을 작업물질로서 1.0 K 부근을 출발온도로 하여 ~20 mK (0.02 K) 부근까지 도달하는 것이 가능하다. 이 방법은 엔트로피 변화가 크고 저온에 도달하는 것이 용이하기 때문에 오래 전부터 확립된 방법이다. 과거에는 ~1 K 부근까지 도달하는데 액체헬륨을 사용하는 등 불편하여 일부 제한된 분야에서 이용되었으나, 최근에 소형냉동기 기술의 발달로 인하여 액체헬륨이 없어도 4 K 이하의 극저온을

얻기가 비교적 용이하여져서 차츰 확산되어가고 있다. 자기냉각의 원리에 대해서 소개하도록 한다. 이 원리는 전자스핀 뿐 아니라 원자핵 스핀을 이용하여 ~ 10mK(0.01K) 이하의 보다 훨씬 낮은 초저온에 도달하기 위해서도 사용되는 방법이다. 상자성 상태라는 것은 전자의 스핀 방향이 무질서하게 분포하고 있는 상태이다. 상자성체의 경우 온도를 낮추어 가면 반드시 어느 온도에서 가자성이나 반자성 상태로 전이한다. 이 성질을 이용하고자 하는 것이다. 그러기 위해서는 출발 온도는 결정격자의 비열 및 엔트로피가 거의 0인 상태가 되는 ~1 K 부근 이어야 하는 것과 이 상태에도 아직 상자성인 어떤 작업물질을 선택할 수 있어야 한다.

다음에 자기냉각 과정에 대해서 설명하도록 한다.

~1 K에서 작업물질인 상자성염 예를 들면 FAA에 외부로부터 1 테슬라 정도의 자기장을 걸어서 등온변화를 한다. 자기장을 걸때에 자기-열 효과(magneto-caloric effect)에 의하여 자화열이 발생하는데 이 열은 소형냉동기 또는 액체헬륨 등에 의해 흡수된다. 이 등온변화에 사용되는 작업물질은 수십~수백 gram 정도이다. 다음에 작업물질이 들어 있는 공간을 진공(~ $10^{-6}$  mmHg)으로 하여 단열상태로 만든다. 자기장을 서서히 낮추어 가면(단열소자) 온도가 낮아진다. FAA의 경우 ~30mK 부근까지 도달할 수 있다. 단열소자를 하여 한번 목표로 하는 저온에 도달하게 되면, 외부의 열침입을 잘 차단한 상태에서는 작업물질의 양에 따라서 수시간 또는 수십시간을 유지할 수 있으며, 연속적으로 이 과정을 반복하여 온도를 낮출 수 있다. 또한 자기냉각장치를 복수로 설치하면 온도의 상승 없이 극저온을 연속적으로 유지할 수도 있다.

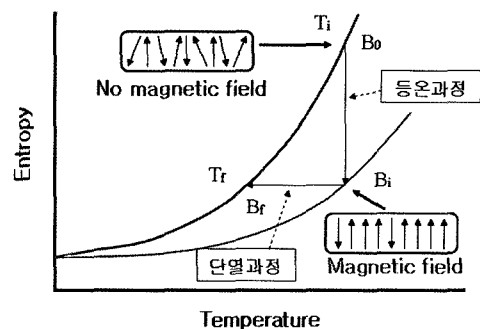


그림 4. 자기냉각과정의 개념도

### 5. NIS 소자에 의한 0.3 ~ 0.1K 온도영역의 냉각

기계적인 구조의 냉각방식 뿐 아니고 초전도 소자를 이용한 냉각도 가능하다. 0.3K~0.1K의 온도영역은 넓지 않으나, 대규모 장치를 사용하지 않고  $^3\text{He}$  냉각시스템이 도달할 수 있는 온도인 0.3K 이하에서 조금 더 내려가고자 한다면 유용하게 사용될 수 있다. 이것은 Peltier 소자와 비슷한 micro-cooler 개념으로서 초전도 소자를 이용한 것이다. NIS(Normal metal Insulation Superconductor) 터널 접합소자로서 Peltier 효과로 냉각되는 이 냉각방식은 냉각하고자 하는 소자와 함께 (on-chip) 제작이 가능하며 비록 냉각능력은 작으나 소형 소자를 냉각하는데는 충분한 냉각능력을 가지고 있다. NIS 소자는 작은 냉각능력이 필요한 TES, STJ, SQUID 등의 소자에 적용할 경우  $^3\text{He}$  냉각시스템에 붙여서 사용하면 되므로, 자기 냉각이나  $^3\text{He}$  과  $^4\text{He}$  희석냉동기 등을 사용하는 번거로움을 들 수 있다.

### 6. $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 희석 냉동기 (Dilution Refrigerator)

물성연구의 발전에 따라 연구자들은 물성의 본질에 대한 규명을 위하여 더 낮은 온도를 얻고자 하였으며,  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  희석 냉동기는 그러한 요구를 만족시켜줄 수 있는 좋은 장치이다. 우선  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  희석 냉동기는 1K~2mK의 넓은 온도 영역에서 연속적으로 실험이 가능하며 또한 초전도자석을 장치하여 극저온 및 자기장 환경에서의 실험을 할 수 있다. 또한  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  희석 냉동기는 sub-mK의 초저온을 얻기 위한 핵자기냉각 (Nuclear Adiabatic Demagnetization Cooling)을 위한 예비 냉각 장치로 이용되기도 한다. 장치는 1962년 London, Clarke 및 Mendoza 에 의해 처음으로 제안되었으며, 1965년 Taconis 등에 의해 첫 실험이 이루어져 ~220mK (~0.22K)에 도달하였다. 현재는 기술의 진보에 따라서 최저온도 2mK에 도달하였으며 극저온 연구실에서는 목적에 따라 자작하여 사용하거나 또한 상용화되어 보급되고 있다. 액체  $^3\text{He}$  과 액체

$^4\text{He}$ 를 섞으면 1 K 이상에서는 골고루 혼합할 수 있다. 그러나 0.8 K 이하가 되면 2상 분리가 일어나서 윗부분이 액체  $^3\text{He}$  ( $^3\text{He}$  농축상, concentrated phase), 아래가 액체  $^4\text{He}$  ( $^3\text{He}$  희석상, diluted phase)가 된다. 물론 이 온도영역에서는  $^4\text{He}$ 는 초유동상태이다. 이 상분리 현상은 미국의 Fairbank에 의해 1967년 발견되었다. 그는 이  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  혼합액 중의  $^3\text{He}$ 의 핵자기공명(NMR)을 관측하는 중 혼합액체가 들어있는 용기와  $^3\text{He}$ 을 관측하는 NMR coil의 상대적인 위치에 따라서  $^3\text{He}$ 의 자기공명선의 강도가 매우 크게 변화하는 것에서 이와 같은 2상분리 현상을 발견하였다.

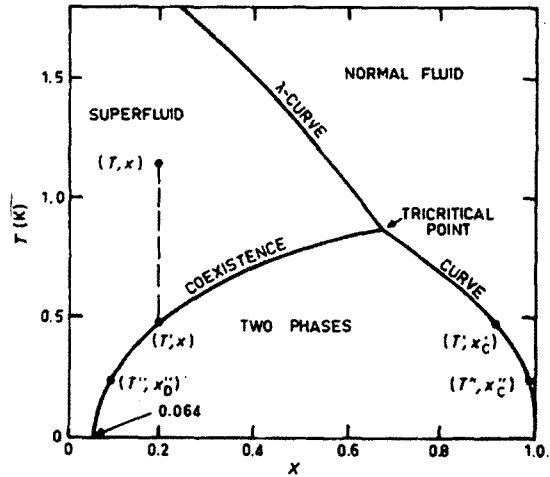


그림 5.  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  혼합액의 상 그림. ( $x = ^3\text{He}/(^3\text{He}-^4\text{He})$ , 즉  $x$ 는 혼합액 중의  $^3\text{He}$  농도를 의미한다.)

그림 5에서 초유동  $^4\text{He}$  가운데는  $^3\text{He}$ 가 최소 6.4%까지 들어갈 수 있다는 것을 보이고 있다. 따라서 그림에 보이는 어느 임의의 위치에서 점선을 따라 이 혼합액을 냉각시켜 가면 2상분리가 일어난다. 이 성질을 이용하여 그림과 같은 장치를 개발하였다. 농도가 평형상태에 있으면 2개의 상은 정지된 상태에 있다. 만일 아랫부분의 초유동  $^4\text{He}$ 속에 들어 있는  $^3\text{He}$ 의 농도가 줄어 들면 상 평형을 유지하고자 하여 윗부분의  $^3\text{He}$ 은 아랫부분에 있는 초유동상태의  $^4\text{He}$ 로 녹아들어가게 된다. 초유동  $^4\text{He}$ 는 엔트로피가 0인 바닥상태이므로 열적으로는 일종의 진공과 같은 개념의 상태이므로  $^3\text{He}$ 이 초유동  $^4\text{He}$ 로 녹아

들어가는 것은 “증발”하는 것과 같은 과정이며 이 때  $^3\text{He}$ 은 잠열을 빼앗기게 되어, 혼합액의 상그림에서 상분리 경계선에 따라서 온도가 낮아지게 된다. 이 방법은 원리적으로는 도달온도에 한계가 없다고 말할 수 있다.

1 mol의  $^3\text{He}$ 이 상분리면을 지나  $^3\text{He}$  회석상으로 들어갈 때 흡수되는 열은 다음과 같다.

$$\Delta Q = T^* [ S_d(T) - S_c(T) ]$$

$S_d(T)$ ,  $S_c(T)$  : molar entropy of  $^3\text{He}$

단위 시간당 상 분리면을 지나는  $\dot{n}_3$  mole 의  $^3\text{He}$ 에 의한 cooling power 는 다음과 같다.

$$\dot{Q} = 84 \dot{n}_3 T^2 \text{ W. (T < 100mK)}$$

실제 장치에서는  $^3\text{He}$ 의 농도를 변화시키기 위하여 외부에서 펌프로서  $^3\text{He}$ 을 배기하여 다시 장치 내로 되돌리는 폐회로로 구성된 장치가 가장 일반적이다 (그림 6참조). 최근에는 외부의 펌프 대신에 장치 내부에 흡착형 펌프를 설치하여  $^3\text{He}$ 을 순환시켜 냉각하는 방법으로도 개발되어 있다.

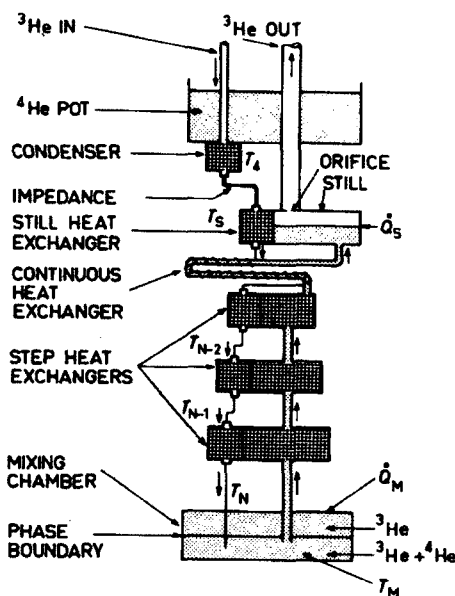


그림 6.  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  희석냉동기

어느 방법으로 된 장치를 사용하여도 주위를 액체헬륨으로 냉각하여야 하며 주기적으로 액체헬륨을 보충하여야 한다. 이와 같은 운영상의 불편을 해소하기 위하여 4K에 도달 가능한 소형냉동기를 사용하여 외부로부터의 열침입을 최소화하고 증발하는 헬륨가스를 재응축하여 헬륨의 증발이 거의 없으며 액체헬륨의 보충이 거의 불필요한 방식도 개발되어 있다.

### 참고문헌

- [1] G.K. White : Experimental Techniques in Low-Temperature Physics. Oxford Science Publications.
- [2] DP.V.E. McClintock, D.J. Meredith, J.K.Wigmore : Low-Temperature Physics : an introduction for scientists and engineers. Blackie & Son Ltd.
- [3] A. Kent : Experimental Low-Temperature Physics, Macmillan Press Ltd.
- [4] O.V. Lounasmaa : Experimental Principles & Methods Below 1 Kelvin. Plenum Press.
- [5] ESA announcement of opportunity GSTP "NIS chip cooling", ref 97, 1YC214,1998)

### 저자이력



김동락(金東洛)  
1953년 4월 4일생, 1976년 경북대학교 물리학과 졸업, 1993년 일본 오사카시립대학 대학원 학위과정 수료 (초저온물리학, 이학박사), 1993 ~ 현재 : 한국기초과학지원연구원 고자기장개발팀 책임연구원.