

低 温 实 験 法

禹 鐘 天* · 劉 寅 碩* · 朴 鐘 喆**

□ 目 次 □

- | | |
|---------------|----------------------|
| 1. 머릿말 | 5. 저온 측정법 |
| 2. 저온을 얻는법 | 6. 저온에서의 물리적 성질 및 응용 |
| 3. 액화장치의 작동원리 | 7. 맺음말 |
| 4. 저온 냉각제 취급법 | 참 고 문 헌 |

1 머릿말

저온이라고 하면 인간이 추위를 느끼는 0°C 이하를 뜻한다고 할 수 있겠으나 산업계에서는 보통 액화천연가스(LNG)의 끓는점인 -150°C, 즉 절대온도 123도(123 Kelvin, 123 K로 표시) 이하 액체질소(77 K), 액체산소(90 K) 온도 영역을 저온이라고 하며, 과학기술계에서는 액체헬륨 온도인 4.2 K 영역을 의미하는 것으로 이해되고 있다.

저온(Low Temperature)은 Cryogenics 라는 단어와 서로 통하며, 이 단어의 본래의 뜻은 「차게 하는것」 즉 저온을 만드는것이라는 뜻이다.

Cryogenics의 발전과정을 잠시 살펴보면 Caill-etet 와 Pictet 가 독립적으로 비슷한 시기에 산소를 액화시키는데 성공한 것이 1877년으로 이때가 저온의 시발점이라고 하겠다. 그후 Linde 와 Claude 가 공기액화장치로 액체질소를 분리해 낸것이 1895년대이고, Dewar 가 보관용기(현재 Dewar 라고 불리우는)의 고안과 아울러 수소 액화에 성공한 것이 1898년, Onnes 가 헬륨을 액화하는데 성공한 것이 1908년이다.

그러나 cryogenics technolgy 의 발전이 본격화

된 것은 중수소 발체 및 rocket 엔진의 연료 개발과 관련되어 1940년대말 대형 헬륨(수소도 가능) 액화장치가 상용화되면서부터로서, 일본의 경우 동경대학교에 대형 헬륨 액화장치가 가설된 것도 이보다 몇년 늦은 1950년대 초이다. 저온 실험이 보편화된 것은 소형 액화장치가 개발되어 상용화되기 시작한 1950년대 말로서, 1960년대 초반에 Space Project 와 관련되어 저온 재료 및 기계가 많이 개발되면서 그 기반을 굳혔다고 하겠다.

우리나라에는 1982년 한국 표준연구소에 이어서 이번에 서울대학교 공과대학에 소형 헬륨 액화장치가 설치된다. 국내에 저온실험의 새로운 장(章)이 열리는 이 시점에 저온 실험법의 기초적인 사항 몇가지를 정리하여 보는 것은 뜻있는 일이라고 생각한다. 내용 중 많은 부분이 cryogenics engieneering 에 속하는 문제로 cryogenics 의 이용자인 우리로서는 이 부분을 소개하는데 능력의 한계를 느낀다. 그러나 서로의 지식을 모아서 이 분야의 발전에 임한다는 취지에서 정리하는 것이니 이점 양해있기 바란다.

소개하는 내용은 먼저 2절에서 저온을 얻는 법을, 3절에서 액화장치의 작동원리를 4절에서는 액체냉각제(Cryogen 혹은 Cryogenic Refrigerant)의 취급법을, 5절에서는 저온 측정법을, 6절에서는 저온에서의 물리적 성질 및 응용의 순서가 되겠으며, 액체 헬륨에 주안을 두어 설명하고자 한다.

* 서울大 自然科學大 物理學科 教授 · 理博

** 韓國標準研究所 責任研究員 · 理博

② 저온을 얻는법

2.1. 상온에서 1 K까지

실험실에서 시료를 냉각시킨다고 하면 우선 액체 질소나 액체 헬륨(He⁴)을 연상하게 된다. 상온에서 77 K까지는 액체 질소를, 그 이하는 액체 헬륨을 써서 냉각하는 것이 보편화된 방법이기 때문이다.

냉각제로는 이 밖에도 표 1에서 알 수 있듯이 액체 수소, 네온, 산소(또는 공기), 알콜, 메탄, 일산화탄소, 이산화탄소(고체) 등이 있으나, 가격면에서나 취급상(안전도)의 문제 때문에 특수한 목적 이외에는 잘 사용되지 않는다. 시료를 77 K나 4.2 K로 냉각시키는 문제는 비교적 간단하다. 이 경우에는 시료를 액체 질소 혹은 액체 헬륨에 직접 담그면 되고, 이것은 가열된 쇠를 찬 물에 담그는 것과 원리나 방법면에서 별로 다를 것이 없다. 그러나 이 이외의 온도를 얻으려면 문제는 약간 복잡하여진다. 이 부분은 77 K 이상 즉 액체 질소를 쓰는 영역과 그 이하 즉 액체 헬륨을 쓰는 영역으로 나누어 설명하겠다.

우선 77 K 부근에서는 액체 질소의 증기압에 따르는 끓는점의 변화(그림 1 참조)를 이용하면 약간은 (60 K ~ 90 K 영역) 조절할 수 있다. 77 K에서 실온까지 계속 온도를 변화시키는 방법 중 보편화된 몇 가지를 소개하면 다음과 같다. (ㄱ) Dewar에 담긴 액체 질소가 증발할 때 액체면은 77 K이고 Dewar의 윗 뚜껑부근은 상온에 가까운 온도이므로 수직방향의 높이에 따라 연속적인 온도층이 형성된다. 이 수직위치에 따르는 온도층을 이용하면 어느 정도 안정된 온도변화를 얻을 수가 있다. (ㄴ) 좁더

세밀한 온도 조절이 필요한 경우에는 시료를 열전도체로 만들어진 소위 cold finger의 한쪽 끝에 부착하고 다른쪽 끝을 액체 질소에 담가서 77 K로 냉각하면서, 시료부근의 cold finger에 전열선을 감아 가열하여 좁으로써 원하는 온도를 유지할 수 있다.

(ㄷ) 앞의 (ㄴ)과 비슷한 방법으로 질소가스를 액체 질소에 담겨 있는 관으로 통과시키어 일단 냉각시

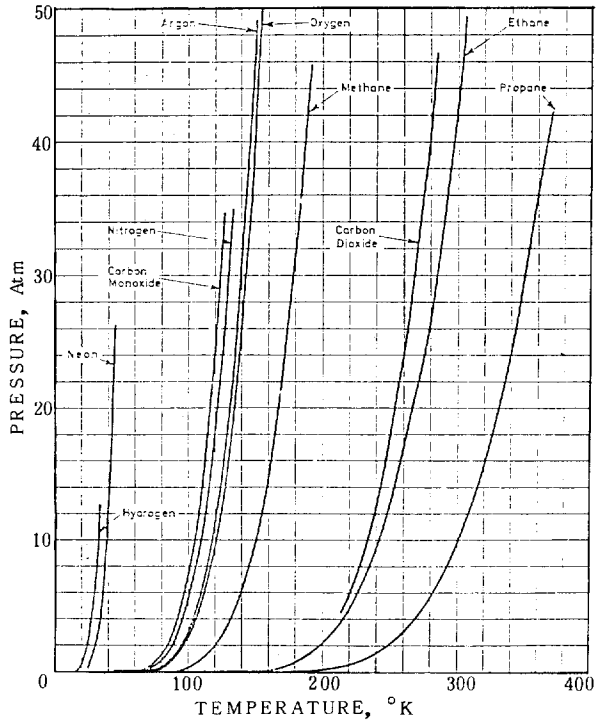


그림 1. 냉각제의 증기압과 온도의 관계

표 1. 냉각제의 물리적 성질

냉 각 제	끓는점 (K)	임계온도 (K)	임계압력 (atm)	액체와기체상태의밀도비*	비 열 (J/gm·K)		기 화 열 (J/gm) (J/cm ³)	
					포화액체**	포화기체**	(J/gm)	(J/cm ³)
Helium-3	3.2	3.35	1.2	460	—	—	8.2	0.48 [†]
Helium-4	4.2	5.25	2.3	770	5.2	6.81	20.2	2.5
Hydrogen	20.4	33.3	12.8	865	9.5	12.0	447.0	31.8
Neon	27.1	44.4	26.9	1,470	1.82	1.17	85.7	104.0
Nitrogen	77.3	126.2	33.5	710	2.05	1.03	199.0	160.0
Fluorine	85.2	—	55.0	975	1.55	0.81	172.0	260.0
Argon	87.3	—	48.3	865	1.14	—	163.0	228.0
Oxygen	90.2	154.8	50.1	880	1.69	0.91	213.0	243.0
Methane	111.7	—	45.8	650	3.45	2.09	508.0	215.0

* 1기압, 300 K에서

** 1기압에서

표 2. 액체헬륨의 증기압과 온도의 변화표 (압력의 단위는 10^{-3} Torr)

T, °K	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	—	—	—	—	—	0.016	0.281	2.288	11.445	41.581
1	120.0	292.2	625.0	1208.5	2155.4	3599.0	5689.9	8590.2	12466.1	17478.2
2	23767.0	31428.0	40465.0	51012.0	63304.0	77493.0	93733.0	112175.0	132952.0	156204.0
3	182073.0	210711.0	242266.0	276880.0	314697.0	355844.0	400471.0	448702.0	500688.0	556574.0
4	616537.0	680740.0	749328.0	822411.0	900258.0	983066.0	1071029.0	1164339.0	1263212.0	1367870.0
5	1478535.0	1595437.0	1718817.0	—	—	—	—	—	—	—

킨 후 이 냉각된 가스를 다시 전열선으로 가열하여 시료 주위를 통과하게 하므로써 시료의 온도를 조절하는 방법도 있다. (ㄷ) 비교적 정확한 온도 조절을 위하여서는 시료를 진공통(vacuum can) 안에 장치한 후 진공통을 액체질소 bath 안에 넣어 77.K로 유지하면서 전열선으로 시료의 온도를 조절하는 방법을 사용한다.

4.2 K에서 77K 사이는 앞서 이야기한 (ㄱ) ~ (ㄷ)과 비슷한 방법을 쓰면 되는데 이때 액체질소 대신에 액체헬륨을 질소가스 대신에 헬륨가스를 쓰면 된다.

1K ~ 4.2 K 사이의 온도는 액체헬륨 (He^4)의 증기압에 따르는 끓는점의 변화를 이용한다. 즉 표 2에서 보는 것과 같이 액체헬륨의 끓는점이 증기압에 따라 변화하므로 액체헬륨이 들어있는 용기의 압력을 진공펌프로 낮추어 주면서 포화점에서 평형을 유지하여 주면 1K ~ 4.2 K구간의 어떤 온도든지 얻을 수 있다.

2.2. 1K이하

1K 이하의 온도를 얻기 위해서는 여러 단계의 냉각법을 복합하여 사용하여야 하며, 필요한 온도의 영역과 조건에 따라 액체헬륨-3 (He^3), He^3 - He^4 희석냉각(dilution refrigeration), 상자성 냉각(paramagnetic cooling), 핵소자성 냉각(nuclear demagnetization cooling) 등의 방법이 이용되고 있다.

우선 0.3 K까지는 액체헬륨-4 (He^4)를 펌프해서 1K까지 일단 냉각시킨 후 끓는점이 낮은 헬륨-3을(표 1참조) 연속적으로 증발시킴으로 시료를 냉각시키는 방법을 쓸 수 있다.

더 낮은 온도를 얻기 위하여서는 상자성 냉각법을 쓰거나 He^3 - He^4 희석 냉각법을 쓴다. 상자성 냉각법은 상자성염(paramagnetic salt)의 단열소자화(adiabatic demagnetization)에 의한 냉각

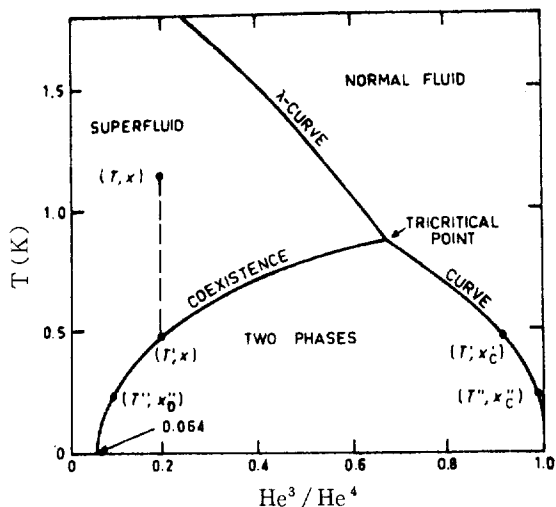


그림 2. 헬륨-3과 헬륨-4 혼합물의 phase diagram

방법으로, 이 방법을 이용하면 수 mK 까지 낮출 수 있으나 높은 자기장을 필요로 하며 연속적으로 냉각시킬 수 없는 단점이 있어서 특별한 경우에 한하여 이용되고 있다.

mK영역을 얻는데 널리 사용되고 있는 장치는 1957년 London에 의하여 고안된 He^3 - He^4 희석 냉각 장치(dilution refrigerator)이다. He^3 와 He^4 를 액체상태에서 섞어 놓으면 혼합액체의 상분리(phase separation)가 생기며 윗 부분에 위치한 He^3 를 펌프로 제거하여 주면 He^4 에 섞여 있는 He^3 의 농도가 감소하면서 그림 2의 위상도(phase diagram)에서 볼 수 있듯이 온도가 낮아진다. 이 방법으로는 수 mK의 온도를 연속적으로 얻을 수 있으며, 장치가 이미 상품화되어 있다.

mK이하의 온도를 얻는데는 핵소자화방법과 paramanehuk 냉각법 즉 고체 He^3 를 고압으로 녹이면서 온도를 낮추는 방법이 이용되며 이 방법으로는

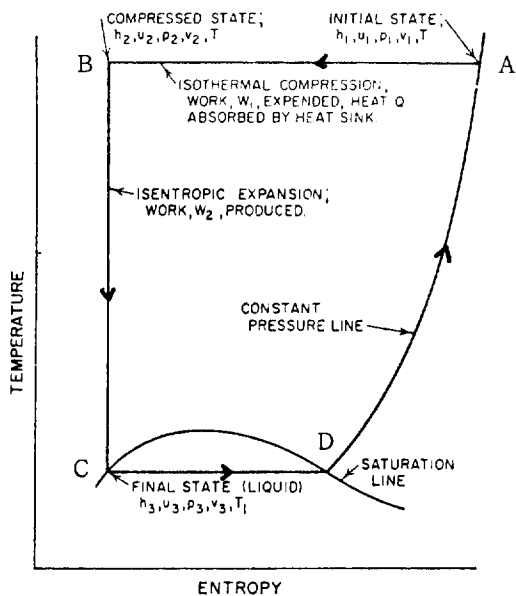


그림 3. 등엔트로피 냉각과정

μK (10^{-6}K) 영역까지도 도달할 수 있다.

3 액화장치의 작동원리

액화장치 즉 저온 냉각유체 (cryogenic fluid)를 만드는 장치의 원리를 고찰하여 보겠다. 사실 이 부분은 cryogenic engineering에서는 중요한 부분이나, 선진국의 경우 액체질소와 액체헬륨이 상용화되어 있어서 (국내에서도 액체질소는 상용화되어 있음) 저온 실험실에서 매우 중요한 요소이면서도 당연히 있는것으로 여겨져 소홀히 취급되기가 쉽다.

액화장치는 열역학적인 과정에 따라 (1) 등엔트로피 냉각 (isentropic cooling) 과 (2) 등엔탈피 냉각 (isenthalpic cooling) 으로 구분된다.

등엔트로피 냉각은 외부일 (external work) 에 의한 냉각 방법이다. 그림 3의 온도 (T)- 엔트로피 (S) 곡선의 A → B 과정에서 일정온도를 유지하면서 기체를 압축시키어 S를 감소시킨후 B → C 과정에서 S를 일정하게 유지하면서 T를 낮추는 방법으로 C → D → A의 과정을 통하여 연속적으로 냉각시키므로 연속순환장치라고도 불리운다.

등엔탈피 냉각은 Joule-Thomson 효과, 즉 기체가 작은 구멍을 통하여 단열 확산될때 온도의 저하가 생기는 효과를 이용하는 방법이다. 그림 4의 헬륨 등엔탈피 온도(T)-압력(P) 그림표에서 보듯이 점선

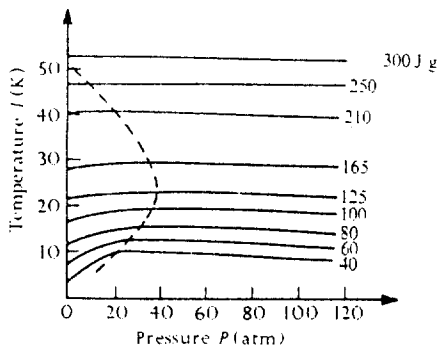


그림 4. 헬륨의 등엔탈피 곡선

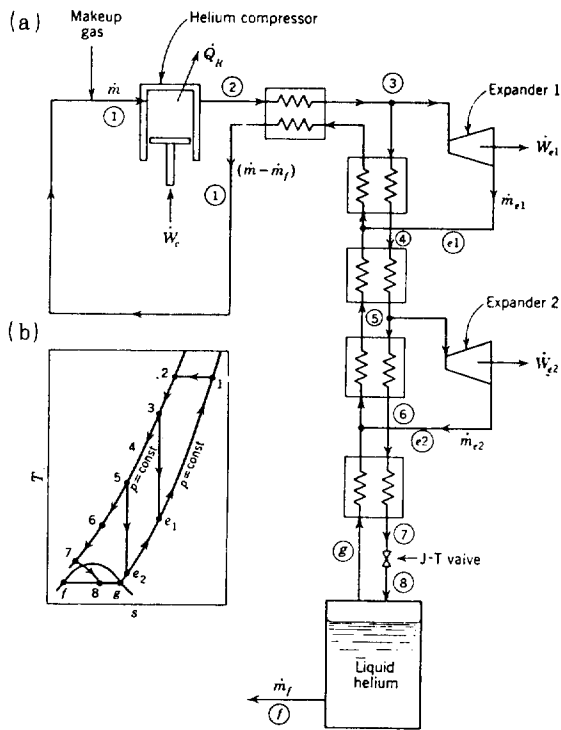


그림 5. Collins 형 헬륨액화장치의 개요도 ;

- (a) 장치 및 작동과정
- (b) 열역학적 과정

안의 부분은 엔탈피가 일정할때 $(\frac{\partial T}{\partial p})_H > 0$ 이고 따라서 압력이 감소할때 (확산과정) 온도가 감소한다 (냉각과정). 이러한 현상은 각종 기체의 고유성질인 기체 분자간의 상호작용에서 기인하는 것으로서 내부일 (internal work) 에 의한 냉각법 혹은 절기관 확산 (throttle expansion) 냉각법이라

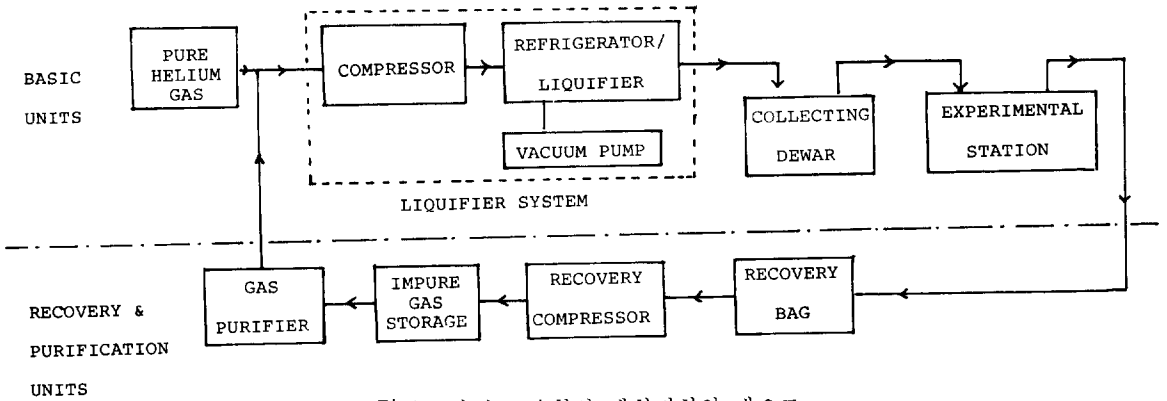


그림 6. 폐회로 순환식 액화장치의 개요도

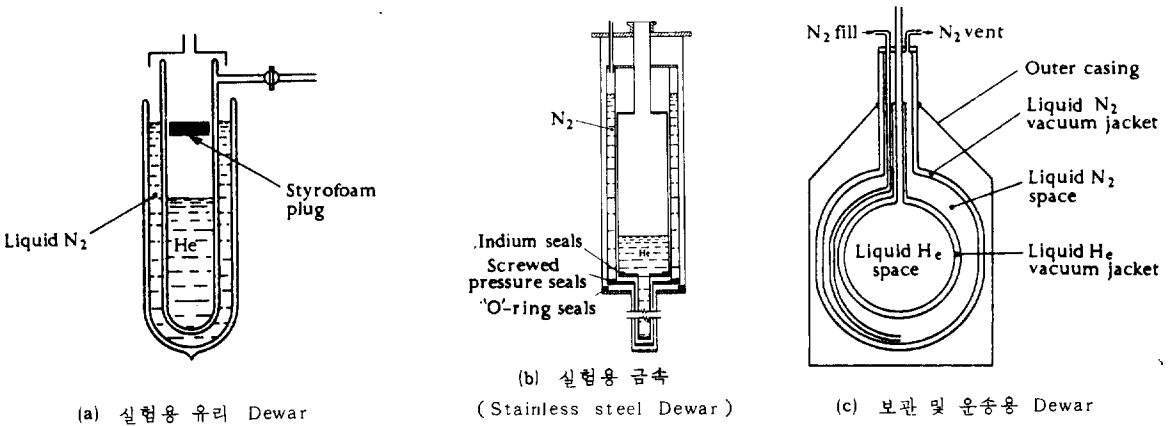



그림 7. 액체헬륨 Dewar의 형태

고 불리운다.

기체의 종류, 냉각 용량 및 온도영역에 따라 효율적인 냉각방법에는 차이가 있다. 또 장치의 액화효율은 열교환기 (heat exchanger) 의 효율에 따라 액화장치의 설계에는 차이가 있게 된다. 여기서는 국내에 도입된 소형 헬륨 액화기를 예로하여 그 냉각 과정을 살펴 보려고 한다.

이들 액화장치는 소위 Collins 형의 개량된 모형으로서 그 작동과정의 schematic diagram이 그림 5(a)에, 열역학적 과정이 그림 5(b)에 표시되어 있다. 그림에서 는 열교환기를 표시하며 작동과정이 그림에 1~8과 e₁, e₂로 표시되어 있다. 이 액화장치는 일단 액체질소로 냉각 (pre-cooling) 되며 첫 확산기 (expander) 에서 (축 ③ → e₁ 과정에서) 60 K를 30 K 정도까지, 두번째 확산 (⑤ → e₂) 에서는 15 K에서 9 K 정도까지 등엔트로피 냉각과정을 통하여 냉각된다. 이들 확산과정의 중간에도 열교환기가 있어서 되돌아 오는 냉각

된 기체로 입력가스의 온도를 낮추고 있다. 최종 단계는 Joule-Thomson Valve 를 통한 확산 (⑦ → ⑧) 으로 등엔탈피 냉각의 과정에 의하여 냉각되어 액화가 이루어진다.

많은 경우 실험에 사용된후 증발된 헬륨 가스는 회수하여 다시 액화하는데 쓰이며, 따라서 이 회수, 보관 및 정제 (purification) 과정을 포함한 폐회로 장치 (closed-cycle system) 은 경제적인 면에서 (특히 우리나라에서와 같이 헬륨 가격이 비싼 경우에는) 거의 필연적인 장치가 된다. 폐회로 순환식 액화장치의 개요도는 그림 6과 같다.

④ 저온 냉각제 취급법

4.1. 저온 냉각유체의 보관

액화된 냉각제는 Dewar 라고 불리는 절열이 잘된 용기에 보관한다. Dewar 는 보온병의 일종으로 Pyrex 유리, Stainless steel 과 같이 열전도율이

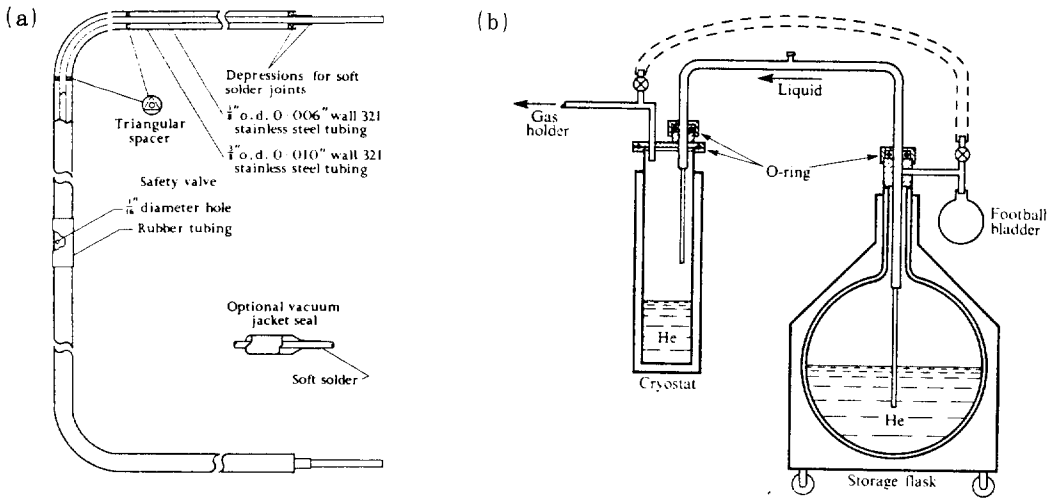


그림 8. 액체헬륨을 옮겨 부울때 사용되는 운송관 (a)과 옮겨 붓는 장치도 (b)

족지 않은 물질로 이중벽을 만들고 벽사이는 진공으로 하여 전도를 방지하고, 또 벽에는 반사막 (reflective coating) 을 입혀 복사열이 들어오는 것을 방지하게 한 것이다.

액체헬륨용 Dewar 는 복사열을 줄이기 위하여 액체질소 공간을 사이에 만들어 놓은것이 보통이나 최근 superinsulation 등 저온 절연물질이 개발되어 액체질소를 사용하지 않고도 보관효율이 높은 Dewar도 있다.

Dewar 는 흔히 보관 (및 운송) 용과 실험용으로 구분되어 상품화 되어 있으며 이들의 몇가지 형태를 그림 7(a) ~ (c)에 소개한다.

4.2. 액체 냉각제의 옮겨붓기

액체질소, 액체공기등 기체의 가격이 싸고 증발열 (Heat of Vaporization, 즉 숨은열) 이 큰것은 (표 1참조) 물을 옮겨 붓듯이 하여도 되는데 비해서, 액체헬륨, 액체 수소의 경우는 그림 8(a)와 같이 주위가 진공으로 절연된 운송관 (transfer tube) 을 써서 옮겨 부어야 한다. 옮겨 부울 때 보관용 Dewar 의 내부 기체압이 실험용 Dewar 내부압 보다 약간 높아야 하므로, 그림 8(b)에서 보는 것과 같이 고무주머니를 부착하여 눌러주거나 압축된 헬륨 가스통을 연결하여 압력을 가하여 주기도 한다.

실험장치를 처음 상온에서 부터 액체헬륨온도까지 냉각시키려 할때에는 액체헬륨을 옮겨 붓기전에 일단 실험 장치를 액체 질소로 냉각 (pre-cooling) 시키는것이 효율적이다.

이는 액체질소의 기화열이 액체헬륨보다 약 10 배

나 높기 때문이다 (표 1참조). 이때 주의하여야 할 것은 pre-cooling 에 쓴 액체질소는 헬륨 가스를 써서 완전히 제거하여 주어야 한다는 점이다. 만일 액체질소가 약간이라도 남아 있으면 많은 열량이 질소가 고화 (solidification) 되는데 소모되는 불필요한 낭비를 초래한다.

Dewar 안에 있는 액체의 용량은 액체면의 위치 즉 높이로 알아내는데, 이 높이는 저항선, 공심측정기, 부기 (float), 압력차등의 방법으로 연속적으로 측정할 수도 있으나, 오차가 크고 다소 복잡하다. 가는 ($\phi = 2 \sim 3 \text{ mm}$) 절연체 (고무, 유리, stainless steel) tube 의 한쪽 끝에 진동막 (혹은 손으로 막아 진동을 느끼어도 됨) 을 달아 반대쪽의 열린끝이 액체면에 닿는 순간 진동수가 급격히 감소하는 것으로 액체면의 위치를 알아내는 방법이 간편하여 흔히 이용된다. 또 절연막대 끝에 작은 탄소저항을 달아 액체면에 닿을때 저항이 급격히 변하는 것으로서 측정할수 있는 방법도 있다.

4.3. 절연

열이 전달되는 방법에는 전도 (conduction) 와 복사 (radiation) 가 있으며, 절연이란 이 두 전달 방법의 합하여진 효과를 최소화 시키는 것이다. 저온용기 (cryostat) 의 설계는 이 복합적인 문제를 기술적으로 해결하여 실용화한 것으로서 대부분의 경우 상품화된것을 사용하므로 설명을 생략하고 실험실에서 당면하는 문제 몇가지를 검토해 보겠다.

전도에 의한 열 손실은 고체와 기체에 의한 것으로 나누어 볼수 있는데 이때 고체는 (γ) 저온 용기의

벽, (나) 실험 장치의 지지대 (니) 전기 도선 등이 되겠다. (기)와 (나)은 열전도가 최소로 되게 하면 해결되나, (디)의 경우 열전도율과 전기 전도율의 상관관계 때문에 간단하지가 않다. 이 경우에는 열전도와 전기저항에서 기인되는 Joule 열의 절충값을 찾아서 도선을 선택하고, 또 이 도선들을 증발하는 냉각기체와 접촉면이 크게 되도록 배치하여 증발 기체에 의한 냉각효과를 피하면 좋다.

기체에 의한 전도는 주로 증발된 기체에 의한 것으로 그림 7(a)에서 보듯이 styrofoam 과 같은 절연물질로 차폐하던가 (대류에 의한 손실의 방지목적도 있음) 보관용 Dewar 처럼 목을 좁게 하는 등의 방법이 있다.

복사는 반사막을 써서 복사열이 들어오는 것을 막고, 또 radiation shield 를 써서 그 효과를 줄일 수 있다. Radiation shield 란 그림 7(a)의 styrofoam 위치에 열전도판을 넣은 것으로서, 복사열은 T^4 에 비례하므로, 만약 radiation shield 가 액체질소와 실온의 중간 온도를 갖는다면 이때 복사열은 $\frac{1}{8}$ 정도로 감소된다는 원리를 이용한 것이다.

실험중 절연상 가장 주의하여야 할 것은 Dewar 의 진공공간의 진공도이다. 특히 금속제품 Dewar 의 경우 용접부분의 불완전 때문에 진공도가 떨어지는 수가 있으며, 심할 경우 액체의 증발 속도가 급격히 빨라지면서 폭발하는 위험도 있다.

4.4. 취급할때 안전상의 문제

산소, 수소, 메탄등 유기물질을 제외하고는 화학적 반응에 의한 폭발 위험은 별로 없다. 그러나 증발된 기체의 압력에 의한 폭발은 유의할 사항이다.

이 현상은 앞서 언급한 절연의 실패에 의한 경우와 Joule 열에 기인하는 경우에 흔히 경험하게 된다. 특히 초전도체 실험을 할 경우 초전도체가 quenching 되면서 갑자기 많은 액체헬륨이 증발되어 이 현상이 일어난다. 그래서 이를 대비하여 실험장치에 안전발브 (safety relief valve) 를 부착하는 것이 바람직 하다.

다른 한가지는 동상 (cold burn) 이다. 냉각액체가 피부 (눈, 코등 안면부분은 위험) 에 닿았을 때는 별로 심하지 않으나, 냉각된 장치 (transfer tube 를 사용할 때 흔히 경험함) 에 닿을 때 순간적으로 화상과 비슷한 효과를 주는 동상을 입는 수가 있다. 예방을 위하여 취급할때 장갑 (절연) 을 사용하는 것이 좋으며, 동상을 입었을때 상처부분을 곧 물에 담가서 냉기를 빼면 효과적이다.

또 실험실의 적절한 환기도 유의하여야 할 사항중의 하나이다. 증발된 기체가 실험실의 대기에 배출됨에 따라 실내 공기의 산소 비율이 감소된다는 사실을 감안하여야 하기 때문이다.

5. 저온 측정법

현재 국제적으로 통용되고 있는 온도 눈금은 1968년 채택된 국제 실용 온도 눈금 (International

표 3. IPTS - 68 과 EPT - 76 의 온도눈금의 고정점 비교표

Reference Point	T_{68} (K)	T_{76} (K)
Triple point of water	273.16	
Condensation point of oxygen	90.188	
Triple point of argon	83.798	
Triple point of oxygen	54.361	
Boiling point of neon	27.102	
Triple point of neon	—	24.559
Boiling point of equilibrium hydrogen	20.28	20.2733
e-H ₂ with vapour pressure of 25/76 standard atm	17.042	17.0372
Triple point of e-H ₂	13.81	13.8045
Superconducting transition (T_C) of lead	—	7.1999
Boiling point of ⁴ He	—	4.2221
T_C of indium	—	3.4146
T_C of aluminium	—	1.1795
T_C of zinc	—	0.851
T_C of cadmium	—	0.519

표 4. 저온 온도 측정기의 비교표

종 류	물리량 및 기본관계식	재 료	측정범위	정확도	비 고
기체 온도계 (Gas Thermometer)	기체의 압력 $PV = nRT$	헬륨	5 K 이상	1 K	간편하고 제작이 쉬움
증기압 온도계 (Vapor Pressure Thermometer)	포화증기압 $\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T \Delta V}$	액체헬륨 액체수소 액체산소 액체질소	1 ~ 4.2 K 14 ~ 20 K 55 ~ 90 K 63 ~ 77 K	0.1% " " "	
금속저항 온도계 (Metal Resistance-Wire Thermometer)	금속의 전기저항 $\frac{dR}{dT} = \text{const}$	백금저항선* 금, 은, Paladium 저항선 rhodium-iron (RhFe) 저항선* Mn, Constantan 저항선, Ni 막저항	10 K 이상 " 0.5 K 이상 2 K 이상	1 mK " " 100 mK	가격이 비쌘
반도체 온도계 (Semiconductor Thermometer)	반도체의 전기저항 $P = R_0 \exp\left[-\frac{\Delta E}{k_B T}\right]$	Ge Thermister* Carbon-in-glass Thermister* Carbon resistor* GaAs p-n diode*	0.5 ~ 30 K 1 K 이상 0.5 ~ 100 K 1 K 이상	5 mK 10 mK " "	
열전쌍 (Thermocouple)	열기전력 $S = \frac{\Delta E}{\Delta T}$	Au : Fe-chromel* Cu 혹은 Fe-Constantan*	2 K 이상 "	100 mK "	기전력 측정 및 온도환산이 불편
축전기 온도계 (Capacitance Thermometer)	유전율 $C = a + \frac{b}{T}$	Ceramic-glass SrTiO ₃ *	0.5 ~ 60 K 70 K 이상	10 mK	
자성 온도계 (Magnetic Thermometer)	상자성체의 자기능력 $X = \frac{C}{T}$	Cerium-magnesium-nitrate 와 같은 paramagnetic salt	0.6 mK ~ 4 K	1 %	초저온 측정가능, 측정방법이 어려움.

* 이미 상품화 되어 있는 것

Practical Temperature Scale ; IPTS - 68) 이다. 이 온도 눈금은 물 (H₂O) 의 삼중점을 기준점으로 273.16 K (0.01 °C) 로 정하고 있으며, 적용되는 최저온도는 13.81 K 이다. 여기에 추가하여 1976년에는 0.5 K ~ 30 K 영역에서 사용할 잠정적인 온도 눈금 (Extended Provisional Scale ; EPT - 76) 을 정하였다. 이 두 온도 눈금의 고정점이 표 3에 비교되어 있다.

모든 온도계들은 온도에 따르는 물리량의 변화를 표 3의 기준점에 대하여 교정 (calibration) 하여 사용하는 것으로서 그 대표적인 것이 백금의 전기저항을 이용한 백금 저항 온도계 (platinum thermo-

meter ; PTR) 이다. 이 온도계는 저항 R_t 를 R_t = R₀ [1 + At + Bt² + C (t - 100) t³] 의 관계식을 이용하여 눈금을 정하며, 이 식에서 R₀, A, B, C 는 상수이고 t 는 섭씨 온도이다.

온도 측정에 이용되는 물리량은 부피, 전기저항, 유전율, 유자율, 열기전력 등이 있으며, 이들을 이용하여 만들어진 온도계를 용도, 정밀도, 측정범위별로 구별하여 요약하여 보면 표 4와 같다. 표 4에 * 가 붙은 것은 이미 상품화되어 있는 것을 의미하며, 측정범위는 개략적인 것으로서 실제와는 차이가 있다. 정확도는 감도 (sensitivity) 와 안정도 (stability) 를 합하여 실용면에서 오는 오차의

한계를 표시한 값이다.

6 저온에서의 물리적 성질 및 응용

일반적으로 대부분의 물리량들은 온도에 따라 변하고 따라서 저온실험의 필요성이 생기게 되나, 저온현상중에서 획기적인 것은 초전도성 (super conductivity) 과 초유체 (superfluidity) 현상이라고 할 수 있겠다.

6.1. 초전도 현상

초전도성은 헬륨액화에 최초로 성공한 Onnes 가 1911년 수은 (Hg) 의 전기저항이 4.2K 근방에서 급격히 영으로 떨어지는 것을 관찰함으로써 최초로 발견되었다. 이후 초전도성은 여러 물질에서 발견되었고, 이 현상에 대한 이해는 Meissner 효과를 기초로한 London 의 설명, Landau - Ginsberg 이론을 거쳐 BCS (Bardeen - Cooper - Schrieffer) 이론으로 정립되었다. (자세한 부분은 이 특집의 다른 논문에 소개됨). 실용면에서는 전이온도가 높은 물질을 찾아내는 것이 중요한 과제이며, 이에 대한 연구는 현재도 여러각도에서 활발히 진행되고 있

표 5. 초전도체의 전이온도 비교표

초 전 도 체	Transition Temperature, T _c K
<i>Elements</i>	
Aluminum	1.191
Cadmium	0.52
Indium	3.408
Lead	7.175
Mercury, α	4.153
Niobium	9.2
Tantalum	4.48
Titanium	0.39
Zirconium	0.55
<i>Alloys</i>	
Nb-Zr of various compositions	9-11
Nb-Ti of various compositions	7-10.5
Mo ₃ Re	10
<i>A-15 Compounds</i>	
Nb ₃ Sn	18.3
V ₃ Ga	14.0
V ₃ Si	17.1

다. 표 5에 흔히 이용되는 초전도체의 전이온도가 소개되어 있다.

6.2. 초유체 현상

액체헬륨 - 4 를 펌프하여 온도를 낮추어 가면 2.19 K에서 갑자기 끓던 액체 표면이 잔잔해 지는것을 볼 수 있다. 이러한 상태의 헬륨을 액체헬륨 - II 상태라고 부르며, 이 변화를 λ -전이 (λ -transition)라고 부른다.

초유체상태에서 유체의 점성도 (viscosity)는 거의 영이 되고, 비열은 급격히 증가한다. 이러한 초유체 현상은 양자액체 (quantum fluid) 인 헬륨의 독특한 현상으로 기본적인 물리현상의 이해와 관련되어 관심을 모으고 있다. 동위원소인 He³의 경우 전자구조는 같은 반면 1mK부근에서 좀 다른 매체에 의하여 초유체성을 갖는것이 밝혀져 관심을 더 하고 있다.

초유체는 아주 작은 구멍을 지나갈 수 있으며, 용기의 벽면을 타고 올라갈 수도 있기 때문에 실험에 어려움을 주기도 한다. 즉 T < 2 K에서 갑자기 Dewar 의 진공공간에 헬륨이 새 들어 간다던지 (소위 super-leakage), 용기의 벽면이 깨끗하지 못할 경우 벽면을 따라서 헬륨막 (film)을 만들어 헬륨의 소모를 증가시키는 수도 있다.

6.3. 저온의 응용

응용면에서 가장 각광을 받고 있는것은 역시 초전도체이다. 전기저항이 영인 성질을 이용하여 높은 자기장을 주는 자석을 만드는 것인데 (현재 최고 18t-esla 까지 가능), 이는 자기 유체역학 발전기 (magneto-hydrodynamic generator), 핵융합로 (nuclear fusion reactor), 입자 가속기 (particle accelerator) 등에 이용되고 있다. 송전선 등 도선으로 여러 응용도를 고려할 수 있겠으나 저온 유지에서 기인되는 경제성때문에 실현되지 않고 있다.

초전도체의 또 다른 응용은 Josephson 효과를 이용한 것이다. Josephson 효과는 두개의 초전도체 사이에 얇은 절연체의 막을 넣어서 접합점을 만들었을때 이 접합점 (Josephson junction 이라 부름)에서 일어나는 현상으로 자기장, 자기장이 없어도 직류 전류가 흐른다던가, 직류 전압을 걸어주면 전류가 rf 진동을 한다던가 하는 현상을 말한다. 이 Josephson junction 의 양자 간섭 (quantum interference) 현상을 이용한 SQUID는 초고감도 (ultra-high sensitivity) 의 측정기로서 10⁻¹⁹ wb의 감도로 뇌

파 (brain wave) 나 심장에서 발생하는 자기장의 변화등 미세한 자기장, 전류 및 전압의 변화의 측정에 이용되고 있다. 또 Josephson 장치는 전압의 표준으로 국가 표준 전압을 유지하는데 사용하고 있으며, 컴퓨터의 기억소자에 이용하기 위한 연구도 활발하다.

저온액체는 연료로서 응용이 가능하며 액체수소와 액체산소는 로키트의 추진 연료로 사용되고 있는것은 잘 알려진 사실이다.

저온은 dry freezing, quick freezing 등 냉동뿐 아니라, 저온에서 생리작용이 중지내지는 속도가 감소됨을 이용하여 정자등 생물체의 보관에도 이용되고 있다.

7 맺음말

저온은 절대온도 영도를 향한 도전 및 양자 액·고체의 문제등을 포함한 전자세계의 신비의 열쇠를 갖고 있어서 학문적인 흥미의 대상이 됨은 다시 강조할 필요가 없다. 그러나 초전도성을 비롯한 물질의 저온에서의 고유한 현상 및 성질은 아직도 알려져 있지 않은

여러 응용 가능성을 내포하고 있으며 새로운 기술을 창조하게 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Guy K. White; Experimental Techniques in Low-Temperature Physics, 3-rd Ed. (Clarendon Press, Oxford, 1979)
- 2) G. G. Haselden; Cryogenic Fundamentals (Academic Press, London, 1971)
- 3) A. J. Croft; Cryogenic Laboratory Equipment (Plenum Press, New York, 1970)
- 4) Randall Barron; Cryogenic Systems (McGraw-Hill, New York, 1966)
- 5) Russell B. Scott; Cryogenic Engineering (D. Van Nostrand Co., London, 1962)
- 6) L. C. Jackson; Low Temperature Physics, 5-th Ed. (Methuen, London, 1962)
- 7) C. Kittel; Introduction to Solid State Physics, 5-th Ed. (Wiley, New York, 1979)