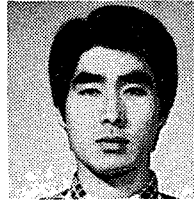


## 극저온 냉동기의 종류와 작동원리

### Classification and Operation of Cryocoolers

정 평 석  
P. S. Jung  
영남대학교 기계공학과



- 1953년생
- 전자제어식 재생기형 극저온 냉동기의 개발에 관심을 가지고 있다.

## 1. 서 론

### 1.1 극저온의 정의

극저온(Cryogenic Temperature)의 정의는 정확히 정의되어 있는 것은 아니지만 대체로  $-150^{\circ}\text{C}$  (123K) 이하 또는 120K 이하의 온도를 일컫고 있으며 이것은 Table 1에서 보는 바와 같이 많은 기체들이 이 온도 이하에서 액화되기 때문이다.

Table 1 Important cryogenic temperatures

Gases	Boiling Temp. K	Critical point		Max.inversion Temp. K
		Temp. K	Pressure atm	
He-3	3.19	3.32	1.15	
He-4	4.214	5.20	2.26	45
H <sub>2</sub>	20.27	33.2	12.98	205
Ne	27.09	44.44	26.2	250
N <sub>2</sub>	77.36	126.1	33.5	621
Air	78.8	133	38.7	603
F	85.24	144.0	55.0	
Ar	87.28	150.7	48.3	722
O <sub>2</sub>	90.18	154.6	50.1	761
CH <sub>4</sub>	111.7	190.7	45.8	939

그러나 10K와 1K를 각각 하나의 주요한 지표로 간주하고 있으며 그 온도 영역에 따라 각각 다른 형태의 극저온 냉동기를 사용하는 것이 유리한 것으로 알려져 있다.

### 1.2 저온학(Cryogenics)의 응용분야

극저온 냉동기의 존재이유는 극저온의 상태를 생성하기 위한 것으로서 그 극저온 상태의 용도는 곧 극저온 냉동기의 응용이 된다. 그런데 일반적으로 저온공학이라고 하면 바로 이 극저온의 용도를 의미하며 따라서 극저온 냉동기 자체는 그러한 분야의 하나의 수단에 불과하다. 따라서 극저온을 응용하는 산업이 부진한 상태에서 극저온 냉동기의 개발이 활발해질 수는 없는 일이다. 그러나 반대로 극저온 상태에 대한 연구 및 산업화는 경제적인 극저온 냉동기의 공급이 뒷바침 되어야 하며 이런 의미에서 극저온 기술의 응용분야를 나열해 보면 다음과 같다.

극저온의 응용기술은 현재로서 거대한 시장이 형성되어 있는 것은 아니고 아직도 많은 부분이 연구단계에 머물러 있으며 대체로 초전도 현상을 이용하는 부분과 측정 및 전자소자의 작동을 위한 분야 그리고 기타 분야로 구분할 수 있다.

1.2.1 초전도 현상의 이용

모든 물리적인 과정은 온도가 낮아지면 반응 속도가 느려짐과 동시에 비가역성이 감소하게 되는데 어느 온도 이하에서는 갑자기 비가역성이 거의 0으로 떨어져서 모든 현상이 가역적으로 진행되며 대표적으로는 전기저항과 유체유동저항이 사라지게 된다. 특히 전기저항이 없는 상태에서는 직경이 작은 전선을 통하여 많은 전류를 흘릴 수 있으므로 소형의 초강력 자석을 제작할 수 있고, 이를 이용하면 다음과 같은 많은 종류의 공학적 응용이 가능하다.

- 입자가속기
- 자기 부상 열차
- 전력 저장
- 마그네틱 베어링
- 에너지 저장장치

1.2.2 측정 및 전자소자

미약한 신호를 감지하고 처리하기 위하여서는 열잡음 등이 최소화 되어야 하는데 이를 위하여서는 감지부를 극저온으로 유지하여야 하는 경우가 많다.

- 조셉슨 컴퓨터 소자
- SQUID(초전도 양자간섭장치)
- 미사일 등의 적외선 감지장치
- MRI(핵자기 공명 영상촬영장치)
- 전자 현미경
- 기타 표준측정

1.2.3 기타 가공 및 분위기 조성

- 초진공 획득용(분자흡착이용)
- 시편제작
- 식품품, 의료품 등의 가공 및 저장
- 액화수소이용 에너지 저장
- 극저온 특수가공

2. 극저온 냉동기의 종류

2.1 극저온 생성의 종류와 원리

일반적으로 고온의 발생은 에너지를 소산시켜 한정된 공간에 많은 열을 투입하는 방식에 의

한다. 그러나 저온의 발생은 이와 같은 간단한 비가역적 에너지 소산방법이 존재하지 않으며 항상 엄격한 열역학적 원리에 따라야 한다.

주어진 물체의 온도를 낮추는 방법은 무엇보다도 그 물체로부터 계속적으로 열을 제거하면 가능하나 그러기 위하여서는 이미 그 물체보다 더 낮은 온도의 물체가 존재하여야 하므로 그러한 방법은 의미가 없으며 부득이 열역학적 상태량들 간의 상관관계를 이용하든지 아니면 두 현상의 비가역 열역학적 상호관계를 이용하여야 한다. 전자의 대표적 경우로서는 기체의 팽창시 온도가 강하하는 원리를 이용한 각종 냉동기와 열 자기효과를 이용하는 자기냉동기가 있으며 후자의 경우로서는 열전효과를 이용한 열전열펌프가 있다.

기체의 팽창을 이용하는 경우에는 다시 등엔트로피 과정과 등엔탈피 과정을 이용하는 두 가지 방법이 있다. 기체를 밀폐공간 내에서 서서히 단열팽창시키거나 가역 터빈을 통하여 외부로 일을 추출하면서 팽창시킬 때 등엔트로피 과정이 되며 이 때 온도가 급격히 낮아지고, 이상기체의 경우

$$T_2 = T_1 (P_1/P_2)^{\gamma/(k-1)}$$

으로서 팽창후의 온도가 계산된다.

등엔탈피과정은 작은 구멍이나 다공질 물질을 통하여 기체를 통과시켜 압력을 낮추는 드룟틀링 과정시 온도가 변하는 줄-톰슨 효과에 의하여 가능하다. 이 때의 온도변화는 이상기체의 경우 엔탈피가 온도만의 함수이므로 변화가 없으나, 실제기체의 경우에는 드룟틀링 과정 전후의 온도 및 압력에 따라 대체로 온도가 상승하며 극히 제한된 범위 내에서만 온도가 낮아지게 된다. 즉, 온도-압력 선도상에서 엔트로피가 일정한 과정은 Fig.1과 같이 나타나며, 시작점과 끝점의 비교에 의하여 온도의 강하 또는 증가를 판단할 수 있다. 그러나 대체로 미소압력강하를 통하여 온도가 낮아지는 영역은 압력이 높지않고 그 최고온도는 임계온도의 5배 정도이다.

자기냉동기의 열역학적 원리는 재생기형과

유사하다고 할 수 있으며 압력 대신 자화도를 변화시키게 된다. 즉, 주어진 상자성체(전자석과 같이 외부에서 자장을 걸어주면 자화되고 자장을 제거하면 자성을 잃는 물질)에 자장을 걸어주면 상자성체는 자화되어 자석이 되는데 이것은 외부로부터 일을 투입해 준 셈이므로 온도가 상승한다. 이 때 액체 헬륨 등으로서 열을 제거해 주면 온도가 일정하게 유지되는데 그 다음 외부의 자장을 제거해 주면 이번에는 반대로 물체가 외부로 일을 해 준 것이 되므로 단열되어 있으면 온도가 하강한다. 이러한 과정을 반복하여 강하된 온도를 다음 단계의 열 제거에 이용하면 초극저온을 얻을 수 있다.

열전열펌프는 온도 차이에 의하여 전위차가 생겨나는 열전대의 원리(Seebeck 효과)의 역으로서, 도체를 통하여 전류를 흘리면 열이 따라 이동하는 현상(Peltier 효과)을 이용하는 것으로서 근래에는 이러한 상관효과가 기존의 금속에 비하여 몇 100배씩 큰 반도체 합금재료의 개발에 의하여 실용화 되고 있다. 잘 알려진 반도체 재료로서는 Bi와 Te의 합금, Si와 Ge의 합금

등의 있으며 극미량 혼입되는 불순물(dopant)의 종류나 양에 따라 P형이 되기도 하고 N형이 되기도 한다.

## 2.2 극저온 냉동기의 종류

극저온 냉동기는 작동원리에 따라 자기냉동기, 열전열펌프 등의 이름이 붙여져 있기도 하나 10~120K 사이에서 가장 일반화 되어있는 기체 압축식 냉동기의 경우 그 종류가 많으며 다시 여러종류로 분류될 수 있다. 즉, 기체의 압축과 팽창을 이용하여 극저온을 얻는 냉동기는 열교환기의 형태에 따라 열교환기형과 열재생기형으로 대별된다. 이것은 단순히 열교환기 형태의 차이만을 의미하는 것이 아니라 필연적으로 냉동효과를 얻는 원리, 나아가서는 기기의 작동원리가 이에 따라 서로 달라지기 때문이다. 즉 열교환기형은 드로틀링 과정에서의 줄-톰슨 효과와 터빈을 통한 단열팽창과정을 이용하며 기체가 서로 다른 통로를 통하여 한 방향으로만 흐르기 때문에 정상유동에 의한 정상작동을 하게 된다. 또한 열교환기형은 기체의 예냉 및 저온도달을 쉽게 하기 위하여 고압관과 저압관 사이에 가역 터빈에 의한 팽창기를 설치하는데 이것의 수에 의하여 Linde-Hampson, Claude, Collins 등의 명칭이 붙어 있다.

반면에 열재생기형은 밀폐공간 내에 들어 있는 기체를 피스톤이나 작은 출구를 통하여 팽창시키므로서 잔류기체가 단열팽창과정을 겪게 된다. 그리고 한 통로를 통하여 기체가 출입하여야 하기 때문에 내연기관과 같이 시간에 따른 주기적인 작동을 하게 된다. 또한 재생기형 냉동기는 밸브의 유무에 따라 Stirling형과 기타로 구분되는데 기타에는 Gifford-McMahon, Solvay, pulse tube 등이 있다. 그리고 밸브가 있는 경우는 분리형 압축기를 사용하므로 압축기의 선택과 작동범위가 자유롭고 압축 및 팽창의 비를 크게 할 수 있으므로 많이 실용화 되어 있다.

이와같은 극저온 냉동기의 분류는 흔히 Fig.2와 같이 나타내며, 각각에 대한 작동 원리는 다음 절에서 설명하기로 하자.

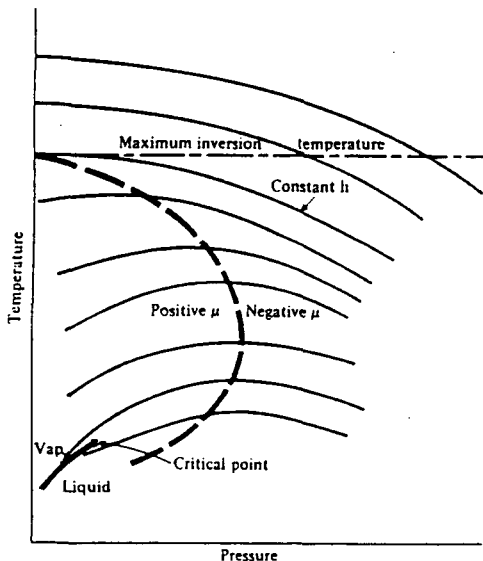


Fig.1 Isenthalpic processes and inversion curve.

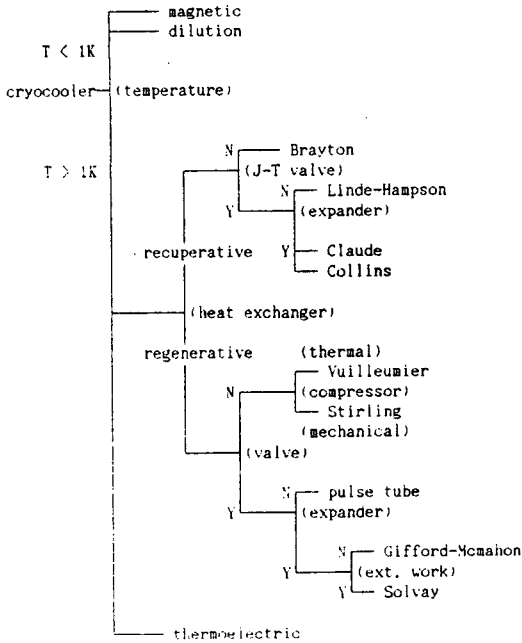


Fig.2 Classification of cryocoolers.

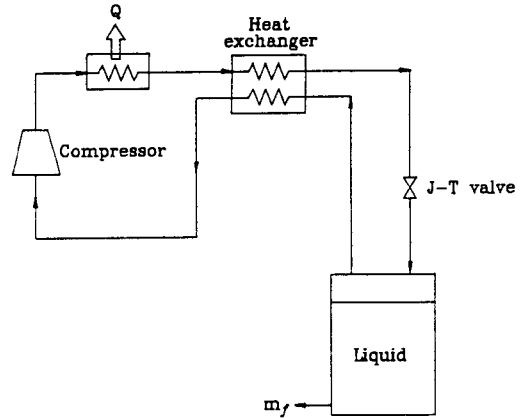


Fig.3 Schematic diagram of Linde-Hampson cryocooler.

공기의 액화장치로서 널리 사용되며 액화된 기체의 일부는 외부로 추출하여 다른 여러가지 목적에 사용되며 나머지는 압축된 기체를 전이 온도까지 냉각시키는 열교환기를 통하여 압축기로 되돌아 간다.

### 3. 극저온 냉동기의 작동원리

#### 3.1 열교환기형 냉동기

##### 3.1.1 Linde-Hampson 냉동기

Linde-Hampson 냉동기는 Joule-Thomson 냉동기라고도 하며 열교환기형으로서는 가장 간단한 형태로 되어 있다.(Fig.3) 즉 상온의 압축기와 열교환기, 팽창밸브 그리고 증발기로 구성되어 있으며, 온도가 강하되는 부분은 팽창밸브이다. 즉 상온에서 압축기에 의하여 단열적으로 기체의 압력을 높이면 온도가 상승하게 되는데 이것을 냉각수 등에 의하여 다시 상온으로 냉각시킨다. 그 다음, 극저온의 저압기체와 대향류 열교환시켜 온도-압력선도 상에서의 전이영역까지 냉각시키고 이것을 팽창밸브를 통하여 등엔탈피 과정으로 팽창시키면 온도강하가 일어난다. 그러나 이러한 작동이 가능하기 위하여서는 작동 초기에 전이 영역까지 예냉된 기체가 있어야 하며 중요한 단점이 되어 있다.

Linde-Hampson 냉동기는 구조가 간단하므로

##### 3.1.2 Claude 냉동기

Linde-Hampson 냉동기는 예냉이 필요한 뿐만 아니라 저온에서의 비열감소 등에 의하여 공기 액화기로는 사용가능하나 헬륨이나 수소는 액화시킬 수 없으며 이를 위하여 열교환기 중간에 고압관과 저압관 사이에 터빈을 설치하여 작동기체의 일부를 저압관으로 누출시키는 것이 Claude 냉동기이다.(Fig.4) 이때 터빈을 통하여 기계적 일이 추출되므로 온도강하효과를 얻게되며 열역학적으로는 예냉 사이클을 추가한 결과가 되고 추출기체량, 추출지점, 투입지점 등의 지정이 주요한 최적설계 문제가 된다.

##### 3.1.3 Collins 냉동기

Collins 냉동기는 Claude 냉동기와 유사하며 열교환기 중간의 터빈을 2개 이상 설치한 것으로 열교환기는 5부분 이상으로 구분되며 복잡한 최적화 문제가 발생된다.(Fig.5) 극저온에서의 여러가지 현상에 대한 연구는 대체로 액체헬륨을 많이 이용하며, Collins 냉동기는 대규모 헬륨 액화기의 주종을 차지하고 있다.

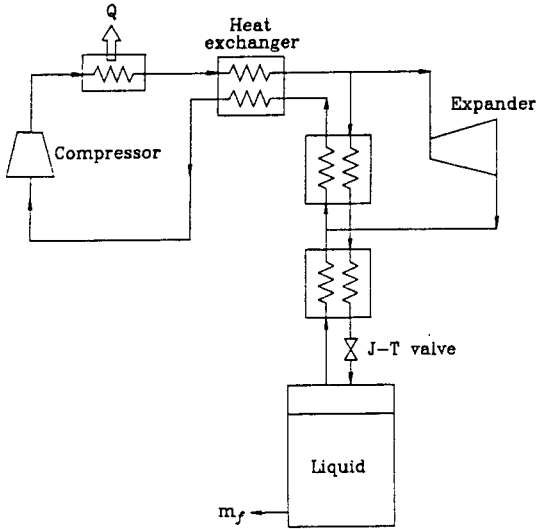


Fig.4 Schematic diagram of Claude cryocooler.

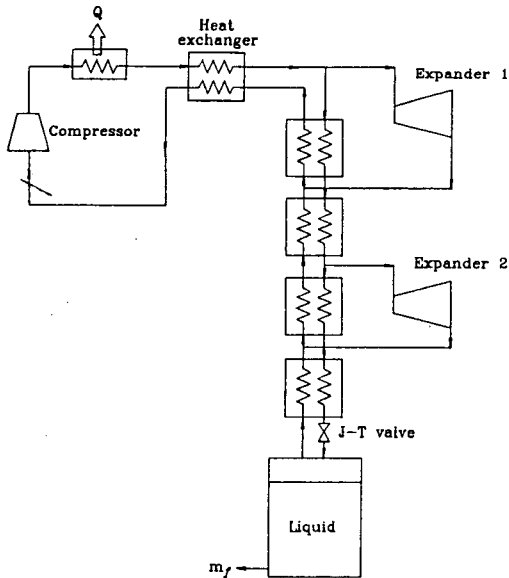


Fig.5 Schematic diagram of Collins cryocooler.

### 3.2 열재생기형 냉동기

#### 3.2.1 Stirling 냉동기

Stirling 냉동기는 Stirling 열기관을 역으로 작

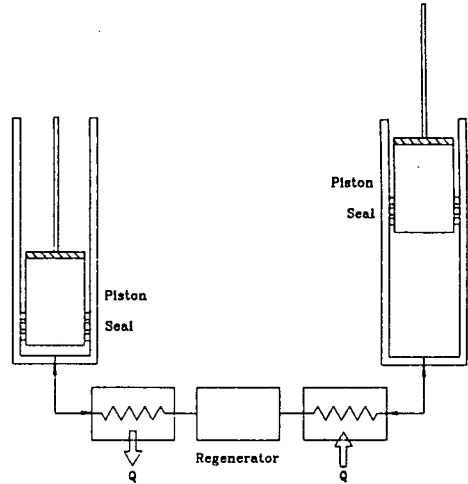


Fig.6 Schematic diagram of Stirling cryocooler.

동시키는 것으로 효율이 높고 설계의 다양성이 주어져서 compact한 구조로 제작할 수 있으므로 80K 이상의 중대용량 냉동기에 널리 사용되고 있다.(Fig.6)

#### 3.2.2 Solvay 냉동기

Solvay 냉동기는 Stirling 냉동기에서 밸브를 사용하여 압축기와 팽창기를 분리한 것으로 범용 압축기로서 예냉된 고압의 기체를 별도로 생성하고 이것을 팽창기의 작동과 연동되는 밸브를 이용하여 팽창기에 투입 누출시키는 원리로 되어 있다.(Fig.7) 즉,

- 1) 피스톤이 실린더 상사점에 있을 때 고압 밸브를 열어 통로 및 재생기의 공간을 고압으로 채운다.
- 2) 피스톤이 하사점으로 이동함에 따라 고압 기체가 재생기를 지나 가역적으로 실린더 내로 투입되고 피스톤은 외부로 기계적 일을 추출한다. 이때 기체는 재생기를 지나면서 재생기에 저장되어 있던 냉기에 의하여 온도가 낮아진다.
- 3) 피스톤이 하사점에 정지해 있는 동안 고압축 밸브를 닫고 저압축 밸브를 열어 기체를 실린더 밖으로 서서히 배출시킨다. 이때 실린더 내부의 기체는 단열팽창과정을

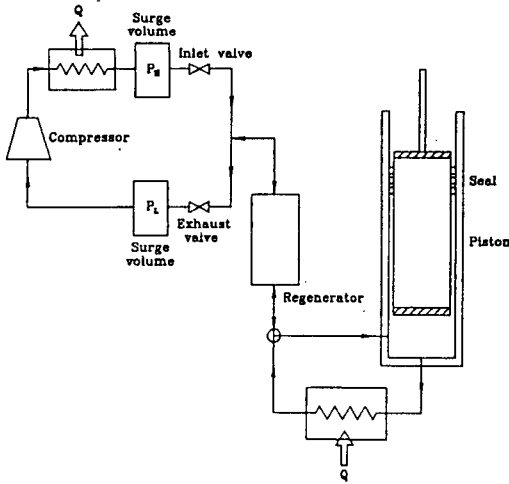


Fig.7 Schematic diagram of Solvay cryocooler.

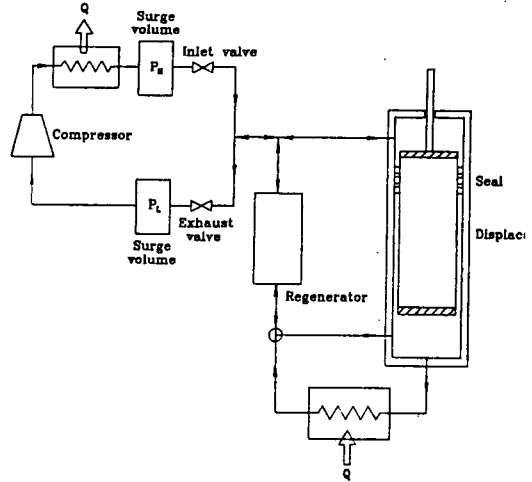


Fig.8 Schematic diagram of Gifford-McMahon cryocooler.

겪으므로 점점 온도가 낮아지고 배출되면서 재생기에 냉기를 저장하게 된다.

- 4) 저압상태에서 피스톤이 상사점으로 이동하면서 실린더 내의 저온저압의 기체를 배출시킨다. 이 때 추가의 냉기가 재생기에 저장된다.
- 5) 1)의 과정으로 되돌아가며 2)의 과정에서 기체가 실린더 내부로 흡입될 때 앞 사이클에서 저장된 냉기에 의하여 투입되는 기체가 냉각된다. 따라서 새로운 사이클은 전번의 사이클에 비하여 항상 더 낮은 온도에서 시작되므로 냉각부의 온도는 점점 더 낮아지게 된다.

### 3.2.3 Gifford-McMahon 냉동기

Solvey 냉동기는 열역학적으로는 훌륭한 원리로 되어 있으나 피스톤을 통하여 일을 추출하기 위하여서는 피스톤의 기밀과 윤활 등이 문제가 되며 이것을 완화한 것이 Gifford-McMahon 냉동기이다. 이것은 재생기 윗부분과 실린더 하부를 관으로 연결한 것으로 조치는 간단하나 피스톤 상하의 압력차를 줄여 기계적인 기밀과 윤활문제를 획기적으로 완화하게 된다.(Fig.8) 그러나 기체충진과정에서 비가역적 압축효과가 일어나므로 열역학적 효율은 낮아지게 되고, 기

계적 일의 추출이 없으므로 출력으로서의 냉동 부하 또한 Solvey형에 비하여 감소하게 된다. 그러나 기계적인 내구성이 중요한 현 시점에서는 Solvey 냉동기는 실용화되지 못한 반면 Gifford-McMahon 냉동기는 단단으로 제작되어 10 K이상의 영역에서 가장 널리 사용되는 극저온 냉동기가 되어 있으며 작동원리는 다음과 같다.

- 1) 피스톤이 실린더 하사점에 있을 때 고압 밸브를 열어 통로, 재생기 및 실린더 상부의 공간을 고압으로 채운다.
- 2) 피스톤이 상사점으로 이동함에 따라 실린더 상부공간의 고압기체가 재생기를 지나 실린더 하부로 이동하고 재생기를 지나면서 재생기에 저장되어 있던 냉기에 의하여 온도가 낮아진다. 이 때 피스톤 상부의 압력은 재생기에서의 기체 유동저항으로 인하여 하부보다 약간 더 높게 유지되며 따라서 외부로부터 기계적일이 조금 투입된다. 그러나 의도적인 입력이 아니며 피스톤을 매우 서서히 이동시키면 이론적으로 입력은 0이 된다.
- 3) 피스톤이 상사점에 정지해 있는 동안 고압측 밸브를 닫고 저압측 밸브를 열어 기체를 재생기를 통하여 실린더 밖으로 배출시킨다. 이때 실린더 내부의 기체는 단

열팽창과정을 겪으므로 온도가 점점 낮아지고 배출되면서 재생기에 냉기를 저장하게 된다.

- 4) 저압상태에서 피스톤이 하사점으로 이동하면서 실린더 내의 저온저압의 기체를 배출시킨다. 이때 추가의 냉기가 재생기에 저장되며 배출된 기체는 실린더 상부공간으로 이동한다.
- 5) 1)의 과정으로 되돌아가며 2)의 과정에서 기체가 실린더 하부로 이동될 때 앞 사이클에서 재생기에 저장된 냉기에 의하여 투입된 기체가 더욱 냉각된다. 따라서 새로운 사이클은 전번의 사이클에 비하여 항상 더 많은 냉기를 저장하게 되므로 냉각부의 온도는 점점 더 낮아지게 된다.

### 3.2.4 Pulse tube

Solvey 냉동기에서 문제가 되는 피스톤을 아예 제거해 버린 것으로 실린더 내의 기체가 기체스프링 역할을 하여 피스톤의 효과가 어느정도 재현되는 것을 이용한 것이다.(Fig.9) 효율은 낮으나 구조가 획기적으로 간단하므로 특수한 용도로 적합하며 기존의 여러가지 냉동기들을 대체할 가능성이 높다.

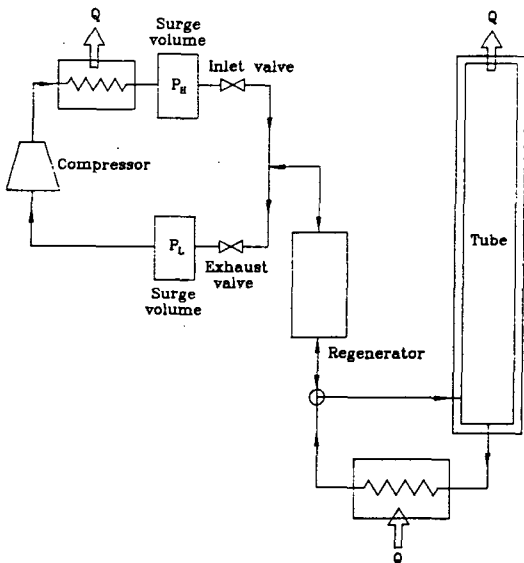


Fig.9 Schematic diagram of pulse tube.

## 3.3 기타 극저온 냉동기

### 3.3.1 열전 열펌프

열전열펌프는 그 구조와 작동이 매우 간단하므로 특수 목적의 냉동에 유리하며 현재로서는 소용량의 냉각장치로서 많이 연구되고 또 상용화도 되어 있으나 극저온용으로는 거의 고려가 되고 있지 않다. 그러나 문헌에 의하면, 저온의 배열원을 이용하고 몇가지 문제점만 해결되면 1K이하의 온도를 얻는 데도 중요한 도구가 될 수 있는 것으로 나타나 있다.

### 3.3.2 자기(磁氣) 냉동기

자기냉동기는 기체의 팽창에 의하여 도달할 수 없는 1K이하의 초극저온을 얻기 위하여 개발되고 나아가서 OK에 접근해 가는 도구로서 위력을 발휘하고 있으며 최근에는 극저온은 물론 상온의 일반냉동기로서의 가능성도 연구되고 있다.

### 3.3.3 혼합형

Gifford-McMahon 냉동기와 Joule-Thomson 냉동기를 결합하여 10K이하 온도의 헬륨의 액화기 등으로 사용하는 형태가 있으며 이때 Gifford-McMahon 냉동기는 Joule-Thomson 냉동기의 예냉기로서 작동된다. 또한 예냉기로서는 열전 열펌프를 사용하는 경우 등도 있다.

## 4. 결 론

극저온 냉동기의 종류와 작동원리 등을 간략히 서술하였다. 국내의 저온공학이 현 단계에서는 대부분 연구수준에 머물러 있으나 이에 대한 국내의 연구를 활성화하는 지름길은, 좋은 극저온 냉동기를 저렴하게 공급하는 것으로서 국내에서도 저온공학의 응용 자체는 물론 극저온 냉동기의 개발과 제작에 대하여도 많은 관심과 투자가 진행되기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. G. Haselden, 1971, "Cryogenic Fundamentals, part 1, part 2", Academic Press, London and New York.
2. Rene A. Gaefer, 1989, "Cryopumping Theory and Practice", Clarendon Press. Oxford.
3. Klaus D. Timmerhaus and Thomas M. Flynn, 1989, "Cryogenic Process Engineering", Plenum press.
4. G. Walker, 1989, "Minature Refrigerators for Cryogenic Sensors and Cold Electronics", Clarendon Press. Oxford.
5. Randall F. Barron, 1985, "Cryogenic Systems", 2nd ed., Oxford Univ. Press.
6. G. Walker, 1983, "Cryocoolers, Part 1, Part 2", Plenum Press, New York.
7. 최현호 외 6인, 1989, "Cryopump 설계 및 제작기술 개발 I", 한국기계연구소, 과학기술처 연구보고서 UCN228-1234C.
8. 김영인 외 5명, 1989, "극저온용 냉동기 개발", 한국과학기술원, 과학기술처 연구보고서 N552-3609-2.
9. 김영인 외 5명, 1990, "극저온용 냉동기 개발", 생산기술연구원, 과학기술처 연구보고서 KAITECH BS PNR 0050-0006-1.
10. 김영인, 장보선, 김용찬, 1989, "극저온 냉동기의 개발", 공기조화 냉동공학, 제 18 권, 제 2 호, pp.108~115.
11. 박종철, 1989, "극저온 생성 및 dc SQUID 개발", 공기조화 냉동공학, 제 18 권, 제 2 호, pp.116~120.
12. 이금배, 백일현, 1989, "SQUID 냉각용 극저온 시스템의 개발", 공기조화 냉동공학, 제 18 권, 제 2 호, pp.121~129.
13. 김영인, 장호명, 1989, "극저온 냉동기(1)", 공기조화 냉동공학, 제 18 권, 제 6 호, pp. 507~514.
14. 김영인, 장호명, 1990, "극저온 냉동기(2)", 공기조화 냉동공학, 제 19 권, 제 1 호, pp.7~18.
15. 김영인, 장호명, 1990, "극저온 냉동기(3)", 공기조화 냉동공학, 제 19 권, 제 3 호, pp. 175~183.
16. 김영인, 장호명, 1991, "극저온 냉동기(4)", 공기조화 냉동공학, 제 20 권, 제 1 호, pp.60~74.
17. 김영인, 장호명, 1992, "극저온 냉동기(5) : 자기냉동기", 공기조화 냉동공학, 제 21 권, 제 2 호, pp.88~99.
18. 정은수, 1992, "맥동관 냉동기", 공기조화 냉동공학, 제 21 권, 제 2 호, pp.75~87.
19. 이금배, 백일현, 1989, "극저온 냉동 시스템의 기본 원리", 대한기계학회 '89년도 춘계학술대회 초록집 pp.522~527.
20. 김영울, 이상용, 장호명, 김영인, 1992, "소형 Gifford-McMahon/ Joule-Thomson 냉동기에서 열교환기의 최적조합", 대한기계학회 '92년도 춘계학술대회 초록집 pp.243~247.
21. 김용원, 정평석, 김수연, 1992, "기계적 구동 장치가 없는 재생기형 극저온냉동기의 제작", 대한기계학회 '92년도 춘계학술대회 초록집 pp.257~260.
22. H.J. Goldsmid and A.S. Gray, 1979, "Thermoelectric refrigeration at very low temperatures", Cryogenics, pp.289~292.
23. A.W.Penn, 1968, "Cascaded Paltier devices for low temperature operation", Energy Conversion, Vol.8, pp.65~69.