講 座

食品의 冷凍冷藏(2)

許 宗 和*

Freezing and Storage of Foods

Jong Wha Hur*

Ⅱ. 냉동의 개요(Introduction of Refigeration)

1. 冷凍의 定義

冷凍(refrigeration)이란 "一定한 空間이나 物體의 溫度를 주위의 온도보다 인공적으로 낮추어 주는 操作", 즉 "熱除去(heat removal)를 의미한다.

冷凍은 얼지 않는 범위에서 온도를 낮추는 冷却(cooling)과 얼리는 凍結(freezing)의 두 가지 뜻을 다 포함하며 이 熱을 빼앗긴 상태를 일정기간 동안 유지시키는 것을 冷藏 또는 低溫貯藏(cold storage)이라 한다.

冷藏에는 얼음을 쓰는 氷藏(icing)과 冷却機(cooler)를 써서 냉각상태를 유지시키는 冷却貯藏(cooler storage) 및 凍結裝置(freezer)를 사용하여 동결상태를 유지시키는 凍結貯藏(freezer storage)등을 들 수 있다.

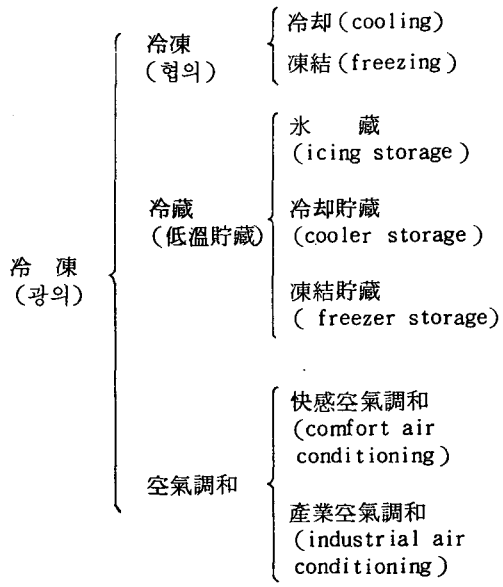
空氣調和(air conditioning)는 어떤 일정한 場所나 空間의 空氣의 溫度(temperature), 濕度(humidity), 淸潔度(cleanliness) 및 氣流(air motion)의 條件을 最適狀態로 유지시켜 주는 것인데, 그 目的에 따라서 집, 사무실, 극장 등 실내의 人間을 대상으로 하는 快感空調(comfort air conditioning)와 기계, 섬유, 화학 및 식품공업 등 生産工程이나 物品을 대상으로 하는 産業空調(industrial air conditioning)의 두 가지로 나눌 수 있다.

넓은 의미의 냉동은 위의 모든 사항을 포함하게 되며, 좁은 의미의 냉동은 냉각과 동결만을 뜻한다.

이와같이, 열을 제거하는 조작(냉동)을 공학적으로 다루는 학문을 冷凍工學(refrigeration engineering)이라 하며, 이를 이해하기 위해서는 기본이 되는 數學, 物理, 化學, 生物은 물론 機械, 熱力學, 熱傳達, 流體力學, 電氣, 自動制御등 관련 학문의 기초가 요구된다.

몇가지 관련 학문의 예를 들면, 熱力學은 냉동공학의 바탕이 되는 기본적인 학문이며, 熱傳達은 냉동에 있어서 가장 중요한 두가지 측면 즉 열이동과 斷熱에 관여하는데, 하나는 증발기,

* 正會員, 慶尙大學校 食品工學科



응축기 등 熱交換器(heat exchanger)의 설계에 응용되고 있는 바와 같이 열교환을 촉진시키는 데에 관한 것이고 또 하나는 냉장고 벽체나 파이프의 保冷에서 보는 바와 같이 열흐름을 방지하는 데에 관한 것으로 열전달 문제는 열교환과 단열의 두가지 면에서 다 效率 및 經濟性을 높일 수 있는 열쇠가 된다고 할 수 있을 것이다.

流體力學은 덕트(duct), 파이프, 밸브, 열교환기, 펌프 등에서 冷媒, 물, 브라인, 공기와 같은 유체의 흐름을 다루는 데에 중요하며, 機械設計의 기초지식은 냉동장치의 설계, 제작에 도움이 될 것이다.

또한 냉매의 성질이나 腐蝕의 연구, 윤활유의 반응, 용액의 성질이나 거동에 관하여 알기위해서는 物理, 化學이 필요하며, 냉동기의 재료를 아는 데에 金屬學이, 에너지 공급에 관해서는 電氣工學 등의 기초도 있어야 되며, 효율적이고 안전한 운전관리를 위해 自動制御(auto control)의 중요성이 증대되고 있다. 공기조화나 食品등의 生體를 다루는 냉동에 있어서는 生物學의 도움도 요구될 것이다. 이와같이 冷凍을 잘 알기 위해서는 폭넓은 관련학문의 기초를 보충하는 노력을 해야 할 것이다.

그러나 一般工學과 마찬가지로 冷凍工學도 應用科學이므로 관련되는 기초학문 이상으로 실제적인 經驗과 技術을 매우 중요시하고 있음을 명심해야 할 것이다.

2. 冷凍의 原理와 方法

(1) 냉동의 원리

우리가 몸에 상처를 입거나 주사를 맞을 때 알콜로 소독하면 시원한 느낌을 받게 되며, 여기에 바람이 불면 더 차가운 느낌을 가지게 된다. 또, 심한 운동 후 땀을 닦지않고 두면 땀이 마르면서 추위를 느끼며, 찬 바람이 불면 더욱 추위를 느끼게 되는데, 이것은 물이나 알콜 등의 액체가 증발하여 기체가 될 때 주위에서 열을 흡수하여 몸에서 열을 빼앗겨 추워지게 되기 때문이다.

만약, 물이나 알콜대신에 ether와 같이 휘발성이 더 강하고 끓는 점이 낮은 용액을 쓴다면 훨씬 더 열을 빨리 빼앗으므로 온도는 더욱 내려갈 것이다. 이것이 우리가 현재 많이 쓰고있는 蒸氣壓縮式 冷凍機의 원리이다. 즉, 저온에서도 증발하는 액체(비등점이 낮은)를 사용하여 저온에서 증발시켜 증발열(heat of evaporation)의 흡수에 의해 冷凍을 한다. 냉동기안을 순환하면서 상태변화에 의해 열을 빼앗는 물질을 냉매(refrigerant)라고 한다.

그러나 증발하기 쉬운 액체라도 다 냉매로 쓸 수는 없다. 왜냐하면 취급의 용이, 안전성, 증발열의 크기, 그리고 가격 등을 고려해서 냉매를 선정해야 하기 때문이다. 현재 가장 많이 쓰이는 것으로 NH_3와 Freon-12를 들 수 있다. 액화 NH_3는 大氣壓下에서 -33℃에서 증발하고 Freon-12는 -30℃에서 증발한다. 그래서 1기압하에서 이들이 증발하는 온도까지는 일정공간이나 물체의 온도를 낮출 수가 있는 것이다. 냉매의 증발로 주위의 열을 흡수하면 냉동의 목적은 완수되는 것이다.

이 냉동만을 생각하면, NH_3나 Freon 또는 액화공기나 액체 질소, 액체 탄산 등을 그림 5와 같이 냉매가 든 고압용기(bombe)에서 팽창밸브를 통해 나오는 양을 조절해 주면 냉매는 이 밸브를 통과하는대로 급격히 압력이 떨어지고 증발하면서 파이프(증발기) 주위에서 열을 빼앗으며, 냉동목적을 달성하고 외기에 버리더라도 냉동자체는 가능한 것이다.

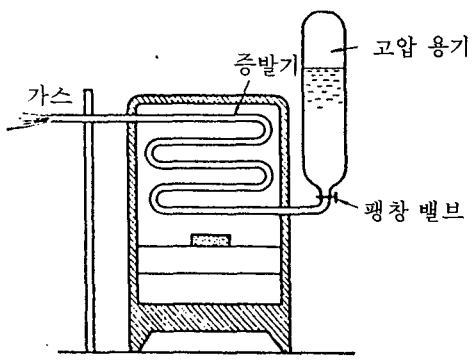


그림 5. 냉동장치의 원리

그러나, 이렇게 증발된 냉매 가스를 공기중에 버리고 다시 고압용기에 넣은 액화 냉매를 구입하여 쓴다면, 공해문제를 일으킬 뿐만 아니라 비용이 많이 들게 되므로 이 냉매가스를 다시 회수하여 계속적으로 사용하게 한다.

이를 위해서는 그림 6과 같이, 냉매가스를 일단 압축기로 압축하여 압력을 높인 다음, 응축기에서 물이나 공기로 냉각시키면 응축(액화)되어 고압용기에 보관된다. 이것을 필요한 양만큼 팽창밸브로 조절하면서 사용하고, 외부에서 전기나 기계적 일을 압축기에 주면, 계속적인 냉동을 할 수 있다.

그림 6에서 보는 바와 같이, 냉동기에 꼭 필요한 부분은 증발장치에 ① 팽창밸브(expansion valve)와 ② 증발기(evaporator)이며, 회수장치에는 ③ 압축기(compressor)와 ④ 응축기(condenser)인데, 이것을 냉동기(증기 압축식)의 4요소라 한다.

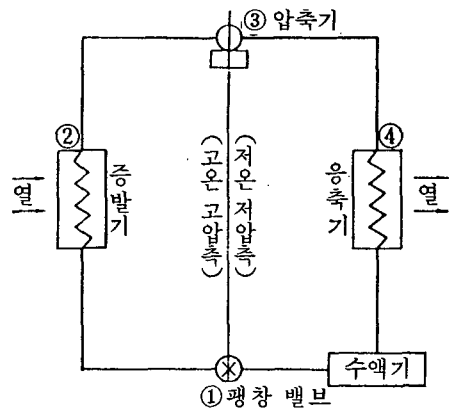


그림 6. 냉동기의 4요소

이 4요소를 순서대로 배관으로 연결하면, 냉매를 버리지 않는 회로가 형성되는데, 이것을 냉동사이클(refrigeration cycle)이라 하며(그림 7), 우리는 이 네가지 과정에서 냉매 상태를 변화시키거나 조절하여 우리가 원하는 저온을 얻을 수 있게 된다.

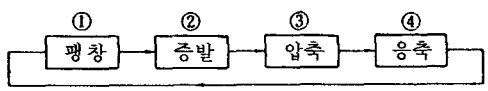


그림 7. 냉동 사이클

이 냉동 Cycle을 $P-h$(압력 - 엔탈피)線圖로 표시하면 그림 8과 같이 나타낼 수 있으며 여러가지 상태를 판단하고 계산을 풀어 갈 수 있다.

이 냉동방법을 기계적 냉동방법의 하나인 증기 압축식 냉동이라고 하며 이 cycle을 증기압축식 냉동 사이클이라 한다.

이 사이클에서 보면 증발이 진행되는 동안은 저온으로서 같은 온도를 유지하고, 또 응축되는 동안 역시 같은 온도를 유지하는 데에도 많은 열량(엔탈피)차이를 내는데, 이와 같이 물체에 상태의 변화를 주는 열을 潛熱(latent heat)이라 하며, 압축하는 동안이나 팽창될 때와 같이 물체에 온도의 변화를 주는 열을 感熱

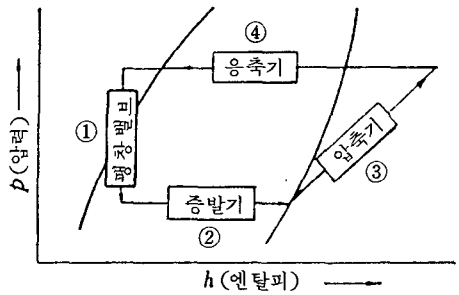


그림 8. $p-h$ 선 도

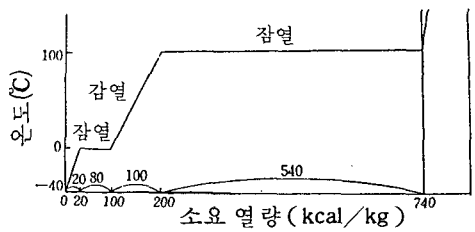


그림 9. -40 ℃ 의 얼음 1kg을 증기로 만들때 까지의 감열과 잠열

(sensible heat)이라 한다. 즉, 감열은 그 차이가 온도계에 나타나고 물이나 공기를 데울 때나 식힐 때와 같이 그 온도 차이를 느낄 수 있으나, 잠열은 물이 끓어서 수증기로 될 때 100 ℃ 를 유지하고, 물이 얼음으로 변할 때 역시 0 ℃ 를 유지하면서 단지 그 상태만이 액체에서 기체로, 액체에서 고체로 상태만 바뀔 뿐이고, 이 때 온도 변화도 없고 온도계에도 나타나지 않으며 느낄 수도 없는 그러한 열이다. 그러나, 실제로는 많은 열량이 잠열의 상태로 흡수되거나 방출된다. 냉동은 이러한 잠열을 이용하는 경우가 많다 (그림 9).

熱 (Heat) { 感熱 (sensible heat) : 물체에 온도 변화를 주는 열
潛熱 (latent heat) : 물체에 상태 변화를 주는 열

(ㄱ) 融解熱 (heat of fusion) : 얼음이 녹을 때와 같이 고체가 액체로 녹을 때 (융해) 주위에서 빼앗는 열량

(ㄴ) 蒸發熱 (heat of evaporation) : 물이 증발할 때와 같이 액체가 기화 (증발)할 때 주위에서 빼앗는 열량

(ㄷ) 昇華熱 (heat of sublimation) : dry ice (고체 이산화탄소, (CO_2))가 승화할 때 주위에서 빼앗는 열량

그림 9는 물의 상태 변화와 온도 및 열량과의 관계를 나타낸 것이다.

어떤 주어진 조건에서, 물질의 총열량은 그 조건에 도달하는데 필요한 감열과 잠열을 합한 것이다.

비열이 C (kcal/kg·℃)인 어떤 물체 M (kg)이 초기온도 t_1(℃)에서 t_2(℃)로 변하였을 때, 그 물체에 주어진 감열 Q_s(kcal)는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_s = MC(t_2 - t_1)$$

또, 잠열 Q_L (kcal)은 다음 식으로 계산한다.

$$Q_L = M\lambda$$

여기서, Q_L (kcal)은 이동한 총 잠열(kcal)이고, λ는 단위 무게의 잠열 (kcal/kg)이다

계산 예1 -40 ℃ 의 얼음 1kg을 1atm에서 100 ℃의 수증기로 만드는데 필요한 열량을 구하라.

(풀이)

① 얼음의 가열 (-40 ℃ 얼음 → 0 ℃ 얼음)
얼음의 비열 $C = 0.5$ kcal/kg℃
감열 $Q_{S1} = 1 \times 0.5 \times \{0-(-40)\}$
$= 20$ (kcal)

② 얼음의 융해 (0 ℃얼음 → 0 ℃ 물)
잠열 $Q_{L1} = 1 \times 80 = 80$ (kcal)

③ 물의가열 (0 ℃ → 100 ℃)
물의 비열 $C = 1.0$ kcal/kg ℃
$Q_{S2} = 1 \times 1.0 \times (100 - 0) = 100$ (kcal)

④ 물의 증발 (100 ℃)

물의 증발 잠열 $\lambda = 540\ kcal/kg$

$Q_{L_2} = (1) \times (540) = 540\ (kcal)$

⑤ 필요한 총 열량

$Q = Q_{S_1} + Q_{S_2} + Q_{L_1} + Q_{L_2} = 20 + 80 + 100 + 540 = 740\ (kcal)$

이 결과를 그림으로 나타내면 그림 9 와 같이 된다.

(2) 냉동방법

냉동방법을 크게 물리적인 자연 현상을 이용한 自然冷凍法 (natural refrigeration) 과 에너지를 공급하여 인공적으로 계속적인 냉동 작용을 얻는 人工冷凍法 또는 機械的冷凍法 (artificial, or mechanical refrigeration) 으로 나눌 수 있다.

- 자연 냉동법
  - 융해열 이용법 (빙장법) : 얼음이 녹을 때 그 융해잠열을 이용한 냉동법
  - 승화열 이용법 (dry ice 냉동법) : dry ice(CO_2)가 승화될 때의 그 승화잠열을 이용한 냉동법
  - 起寒劑 이용법 (기한제 냉동법) : 얼음과 소금 등의 기한제를 이용한 냉동법
- 인공 냉동법 (기계적 냉동법)
  - 증기 냉동법 : 증발하기 쉬운 액체가 증발할 때 흡수하는 증발 잠열을 이용한 냉동법 (NH_3 , Freon)
  - 공기 냉동법 : 압축공기가 고압 상태에서 저압 상태로 팽창될 때의 열흡수를 이용한 냉동법
  - 볼텍스 튜브 냉동법 : Vortex tube 를 이용한 냉동법
  - 열전 냉동법 : peltier 효과를 이용한 냉동법

A. 자연냉동법

① 빙장법 (얼음 냉동법 ,ice refrigeration)

이 방법은 얼음을 쓰는 가장 간단한 방법으로, 오랫동안 냉동 수단으로 이용되어 왔다. 얼음은 0 ℃에서 녹으므로 0 ℃ 이하를 유지할 필요가 없는 경우 또는 0 ℃ 에 가까운 저온을 얻기 위해 쓰이는데, 얼음 1 kg 을 녹이면 79.68 kcal 의 열량을 흡수하게 된다. 그러나 얼음 자체는 공장에서 - 10 ℃ 정도에서 만들어지고 - 5 ℃ 정도에서 보관되므로 물체를 얼음 속에 묻거나 소금을 섞으면 영하의 저온을 얻을 수도 있다.

얼음 냉장고는 위쪽에 얼음을 넣는 용기와 아래쪽에 저장 공간을 가진 단열벽 구조로 만들어지는데, 얼음에 의해 냉각된 공기는 밀도가 크므로 밑으로 흐르고, 더워진 공기는 위로 올라가는 대류 현상에 의해, 냉장고 안을 골고루 차게 해 주기 위해서는 얼음을 반드시 위쪽에 두어야 하고, 공기가 순환할 통로를 만들어 주어야 한다.

이 얼음 냉동법은 얼음이 녹은 물 때문에 냉장고안에 높은 습도를 유지해 주므로 식품등을

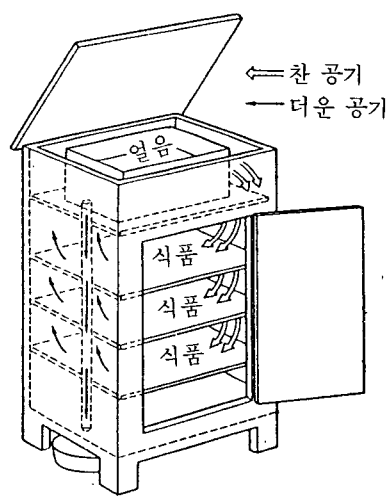


그림 10 . 얼음 냉장고

저장할 때 다른 냉동법에 비하여 현저하게 건조를 막을 수 있는 장점이 있으며, 특히 과실, 야채, 생선등과 같이 신선한 맛을 유지하기 위하

여 동결시키지 않고 단기간 저장하거나, 수송하는데 적합한 방법이다.

② 드라이 아이스냉동법 (dry ice refrigeration)

탄산가스 (CO_2) 를 압축, 냉각하여 얻어진 고체 이산화탄소 (dry ice) 가 승화할 때 주위에서 승화잠열을 흡수하는 것을 이용한 냉동법으로, 드라이 아이스는 1 기압하에서 -78.0 ℃에서 승화하므로 아주 낮은 온도를 얻을 수 있고, 137 kcal/kg 의 승화 잠열을 흡수한다. 여기에 -78 ℃ 에서 0 ℃로 될 때까지 요하는 15 kcal/kg 의 감열을 합하여 모두 152 kcal/kg 의열을 빼앗으므로 얼음에 비해서 약 2 배의 냉동능력을 가진다.

냉동 식품등을 드라이 아이스로 동결시키는 냉장고는 두터운 단열재로 벽을 만들어야 하며 (그림 11), 맨손으로 만져서는 안된다.

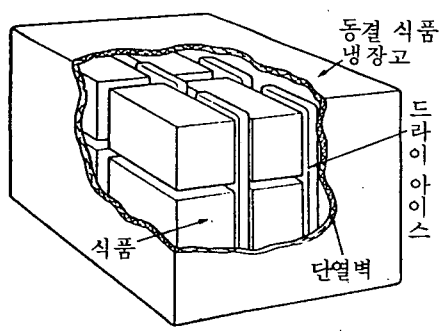


그림 11 : 드라이 아이스 냉장고

드라이 아이스는 아주 낮은 온도를 얻을 수 있고 냉동능력이 우수하며, 승화되어 바로 기체가 되므로 흐르는 액이 없고 이산화탄소가 냉장고 안에 퍼져서 산화를 억제하고 세균의 발육을 막을 수 있어 식품 등의 장기 수송에 편리한 반면, 얼음보다 값이 비싸고 대규모로 이용할 수가 없으며, 일단 만든 후에는 장기 보관이 곤란한 단점이 있다.

③ 기한제 냉동법 (freezing mixture refrigeration)

이 방법은 얼음이나 눈에 소금을 섞을 때 얼음의 융해잠열과 소금의 용해잠열이 상승 작용하여 0 ℃ 보다 훨씬 낮은 온도를 얻을 수 있는 기한제를 이용하는 냉동법이다.

우리가 얼음을 녹이면 0 ℃ 이하를 얻을 수 없고, 또 소금을 물에 녹여도 상온보다 약간 낮을 뿐 영하의 저온을 얻을 수 있다. 그러나, 이 비율을 달리하여 더 묽거나 진하게 하면 이 온도는 다시 올라가게 된다. 기한제에는 얼음과 소금의 혼합물 외에도 얼음과 염화칼슘, 묽은 황산 등의 여러 물질을 이용할 수 있다.

〈 표 2 〉 기한제의 종류와 최저온도

기 한 제	최저온도
얼음 + 소금 (3 : 1)	- 21.2 ℃
얼음 + 염화칼슘 (10 : 4.3)	- 55 ℃
얼음 + 묽은염산 (1 : 1)	- 12 ℃
얼음 + 묽은황산 (1 : 1)	- 35 ℃
에틸에텔 + 드라이 아이스	- 77 ℃
에틸알코올 + 드라이 아이스	- 72 ℃

B. 인공냉동법

④ 증기 냉동법 (vapor refrigeration)

NH_3, Freon 등 냉매액체가 기화 (증발) 될 때 냉매가 흡수하는 증발 잠열을 이용한 냉동법으로서, 식품공업등에 현재 가장 많이 이용되고 있는 방법이다.

NH_3 의 경우, 액체 암모니아는 1 기압하에서 -33 ℃ 에서 증발하면서 327 kcal/kg 의 증발잠열을 흡수하며, Freon-12 는 -30 ℃에서 40 kcal/kg 의 증발 잠열을 흡수한다. 물은 100 ℃ 에서 기화할 때 539 kcal/kg 의 증발잠열을 얻는데, 이것은 얼음의 융해 잠열 (79.68 kcal/kg) 에 비하여 6 배나 큰 값이다.

이와 같이 증발 잠열이 큰 잇점을 활용한 증기 냉동법은 기화된 냉매를 회수할 때 압축기를 사용하여 압력을 높이는 증기 압축식 냉동법

(vapor compression refrigeration)과 물에 잘 녹는 냉매(NH_3)를 물에 흡수시킨 후 압축기를 쓰지 않고 가열에 의해 압력을 높이는 흡수식 냉동법(absorption refrigeration)으로 크게 나눌 수 있다(그림 12).

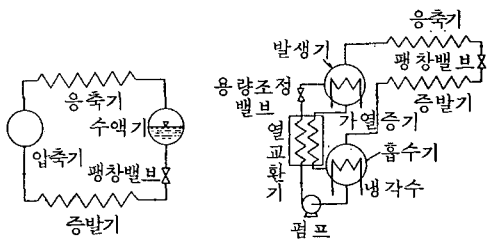


그림 12. 증기 압축식 냉동기(a)와 흡수식 냉동기(b)

냉동기의 증발기(evaporator)는 열을 흡수하는 저온 발생기이며, 응축기는 열을 방출하는 난방기이다. 이 장치의 저온 쪽을 이용하면 냉동장치가 되고, 고온쪽을 이용하면 열 펌프(heat pump)가 된다(그림 13).

이와같이, 냉동기란 일방적으로 저온만을 생성하는 것이 아니고, 반대쪽에는 반드시 고온을 생성한다.

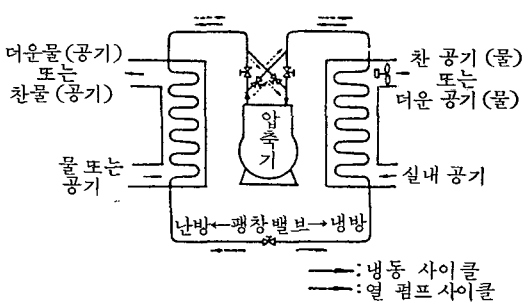


그림 13. 냉동장치와 열 펌프

냉동장치를 난방기 등의 열 펌프로 사용할 때에는 직접 이용이 불가능할 정도로 온도가 낮은 열에 기계 에너지를 가하여 온도를 높여서 열 에너지로 바꾸는 것인데, 소비된 기계 에너지에 비하여 총 에너지량을 많이 얻는 방법이다.

⑤ 공기 냉동법

공기 냉동법은 압축 공기나 기체를 팽창시킬 때 공기의 온도가 내려가는 현상 즉 Joule-Thomson 효과를 이용한 것인데, 공기를 압축하여 따뜻해진 압축공기를 상온으로 냉각시킨 후 팽창 터어빈 안에서 단열팽창에 아주 가깝게 팽창시키면 저온의 공기를 얻게 되며, 이 찬 공기로 냉동을 하게 된다. 이 방법은 공기의 압축이나 팽창에 왕복식 압축기나 팽창기를 사용하면 냉동능력에 비하여 부피가 크고 효율이 나쁘므로, 일반 냉동기에는 거의 사용할 수 없으나, −100 ~ −200 ℃ 정도의 극저온 범위에서는 효율이 좋으며, 또 압축기나 팽창기의 피스톤을 터어빈으로 대치하면 크기를 줄일 수 있어 냉동능력에 비하여 장치가 소형 경량화되므로, 액체공기의 제조 및 항공기의 냉방장치 등 특수한 경우에 사용된다.

⑥ 보르텍스 튜우브 냉동법(vortex tube refrigeration)

渦流(vortex)를 일으키는 간단한 구조를 가진 튜우브에 접선 방향으로 압축 공기를 불어 넣으면 벽 쪽의 공기는 더워지고 중심부의 공기는 차가와지는 현상을 이용한 공기 냉동법의 하나로 볼 수 있다.

그림 14에서와 같이 vortex tube의 노즐에서 관의 접선 방향으로 압축공기를 불어 넣어주면, 와류가 형성되면서 바깥쪽에는 원심력에 의해 압력이 높아져 공기 온도가 높아지며, 중심부에는 저압이 되어 공기의 온도가 낮아진다.

이 vortex tube는 금속학자인 G.J. Ranque (佛, 1930)가 cycle 除塵器中의 공기온도는 주위 쪽보다 가운데 쪽이 차가와지는 것을 발견하여 만든 것이므로 Ranque tube 라고도 하며, 이 방법으로 R. Hirsch (獨)는 20 ℃, 10 kg/cm² 의 압축 공기를 vortex tube에 불어 넣어

-40℃ 정도를 얻을 수 있었다.

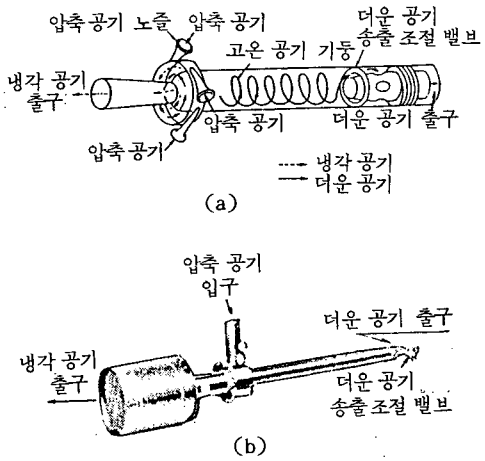


그림 14. 보르텍스 튜우브

병렬회로로 여러개를 사용하면 큰 용량을 얻을 수 있으며, 이 냉동방법은 신선한 공기와 찬 공기가 동시에 요구될 때 매우 좋은 방법인데, 광부 등 산업근로자를 위한 헬멧에 유연한 튜우브를 통하여 찬 공기를 보내어 냉각과 환기(호흡) 등 안전관리용으로 이용된다.

⑦ 熱電냉동법

제에베크(Thomas J. Seebeck, 1821)는 다른 종류의 도체로 된 폐회로의 접점에 온도차가 생길 때 열전류가 발생하는 현상(Seebeck effect)을 관측하였는데, 그 후 펠티어(Jean C.A. Peltier, 1834)는 이의 반대현상, 즉 다른 종류의 도체의 접합에 전류를 흐르게 하면 접점이 열을 흡수하거나 방출하는 현상(Peltier effect)을 발견하였으며, 이 원리를 응용한 열전 냉동기는 2종의 반도체 P형 엘레멘트(element)와 N형 엘레멘트를 구리나 알루미늄과 같은 열전도율이 좋은 금속판에 부착시켜, 열전쌍(thermocouple)의 모양으로 배열하여 여기에 직류를 통과시키면 한쪽 접점부인 냉접점에서 흡열(냉각)되고, 다른 쪽의 접합부인 열접점에서는 방열(가열)된다. 이 흡열 부분을 냉동이나 냉방으로 쓰고, 방열부분을 가열이나 난방으로 쓸 수 있으며, 직류 전류의 방향을 바꾸면 냉접점과 열접점이 서로 바뀌어 냉·난방을 바꿀 수 있게 된다 (그림 16).

열전 냉동법은 열용량의 부족, 가격 등의 문제 때문에 정밀한 실험용 항온조나 잠수함, 미사일 등의 군사 목적등에 쓰이고 있다.

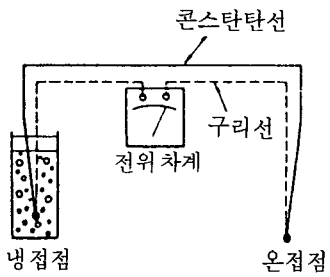


그림 15. 열전쌍의 원리

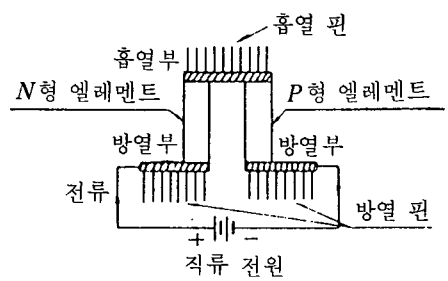


그림 16. 열전 냉동기