# Refrigeration and Liquefaction

## The Carnot Refrigerator

Refrigerator는 공급 받은 에너지를 통해 낮은 온도의 열원에서 열을 흡수하여 높은 열원의 열원으로 흡수한 열을 배출하는 장치입니다. 그러므로 Heat engine의 정반대로 생각할 수 있습니다. 즉,

| Heat Engine | | Refrigerator |
|---|---|---|
| 고온에서 열을 공급 받는다 | ↔ | 저온에서 열을 공급 받는다. |
| 터빈과 같은 장치를 통해 일을 외부에 한다. | ↔ | Compressor과 같은 장치를 통해 일을 외부에서 얻는다. |
| 저온에서 열을 방출한다. | ↔ | 고온에서 열을 방출한다. |

Refrigeration은 Heat Engine을 거꾸로 운전하면 얻어지는 결과라 할 수 있습니다. 이러한 Refrigerator 중에 가장 단순하고도 이상적인 것은 Carnot Refrigerator입니다.

Carnot refrigerator에 대해서 성능계수 w(coefficient of performance)를 도입하는데, 다음과 같이 정의됩니다.

$$w = \frac{|Q_C|}{W} \quad (\text{Heat absorbed at the lower temperature / net Work})$$

$$w = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|} = \frac{1}{\frac{|Q_H|}{|Q_C|} - 1} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_C} - 1} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

성능계수 w는 $T_H$가 크거나 $T_C$가 작을 때 작음을 알 수 있습니다.

## The Vapor -Compression Cycle

간단한 증기 -압축식 냉동사이클을 그림.1에 표시하였습니다. (a)는 주로 대용량의 냉동공정을 보여주는 것이고 (b)는 소용량을 위한 냉동공정을 보여줍

니다.

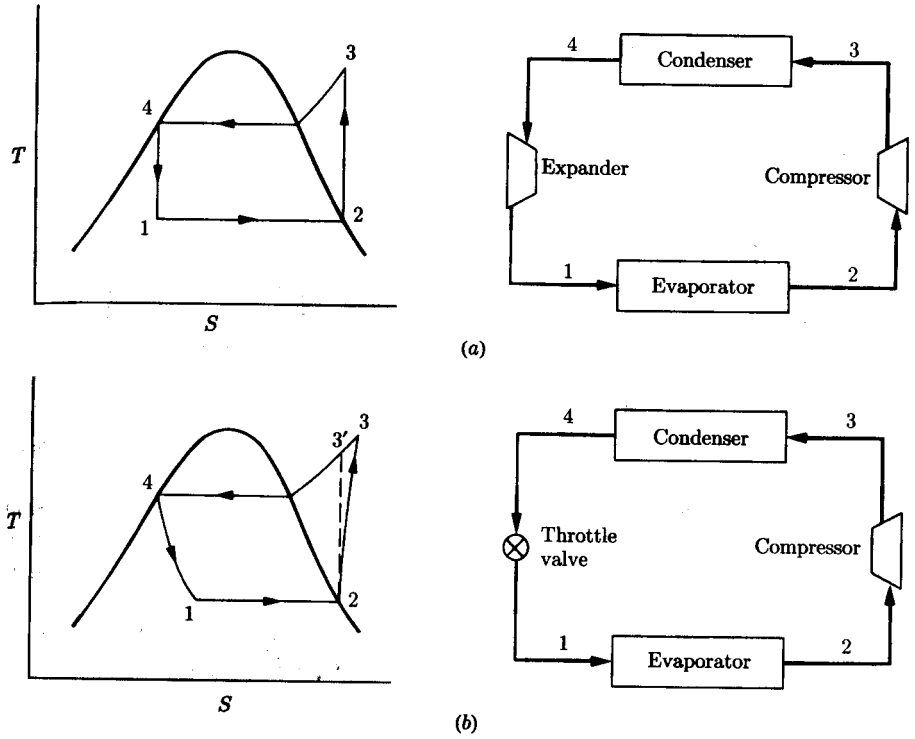


그림. 1 증기-압축식 냉동 사이클

(a)에서는 액체를 팽창시키는데 expander를 사용했지만 (b)에서는 소형의 throttle valve를 사용한 것이 차이입니다. 그러므로 (a)에서는 엔트로피가 1-4 단계사이에서 일정하지만 (b)에서는 증가하기 때문에 (a)는 에너지손실이 적어야 하는 대용량의 냉동공정에 사용됩니다.

두 공정의 condenser에서는 일정온도와 압력에서, evaporator에서는 일정압력에서 응축과 증발과정이 일어납니다. 그러므로,

(a) 공정에 대해서

$|Q_C| = \triangle H = H_2 - H_1$, $|Q_H| = H_3 - H_4$이므로

성능계수 w는 $w = \dfrac{H_2 - H_1}{(H_3 - H_4) - (H_2 - H_1)}$가,

(b) 공정은 throttle valve를 통해 condenser에서 나온 액체를 액체+기체 혼합물로 만드는 과정으로 등엔탈피(isenthalpic) 과정을 통해 이루어집니다. 그러므로 $H_4 = H_1$이므로,

$w = \dfrac{H_2 - H_1}{H_3 - H_2}$이

됩니다.

Rate of circulation of refrigerant m은 다음과 같이 위에서 구한 값들을 통해 정의됩니다.

$$m = \frac{|Q_C|}{H_2 - H_1}$$

## The Choice of Refrigerant

Carnot Cycle에서는 기관의 효율은 냉매의 종류와는 관계가 없었습니다. 하지만 냉매의 종류에 따라 증발기와 응축기에서의 조업압력은 영향을 받으며 이것은 $T_H$-$T_C$의 차에 대한 제약을 가합니다.

예를 들면, 단일 cycle 인 경우 $T_C$=-50($^o$F), $T_H$=86($^o$F)이면
HFC-134a를 냉매로 사용할 경우 $P_C$=5.6, $P_H$=112이므로 압력의 비가 20이 됩니다. 압력비가 매우 차이가 나기 때문에 합리적인 설계가 어렵습니다.
이런 경우에는 그림. 2와 같이A two-stage cascade refrigeration system을 구성하면 그러한 문제점을 피할 수 있습니다. cycle 1에 propylene을, cycle 2에 HFC-134a를 사용할 경우 각각 압력비가 5.3과 3.6이 되므로 합리적인 조업이 가능합니다.

HFC134-a가 냉매인 경우 condenser와 interchanger에서의 압력비가 5.3이 된다. 단일 시스템으로 구성할 때보다 훨씬 작다.

Propylene이 냉매인 경우 Evaporator와 interchanger에서의 압력비가 3.6이 된다.

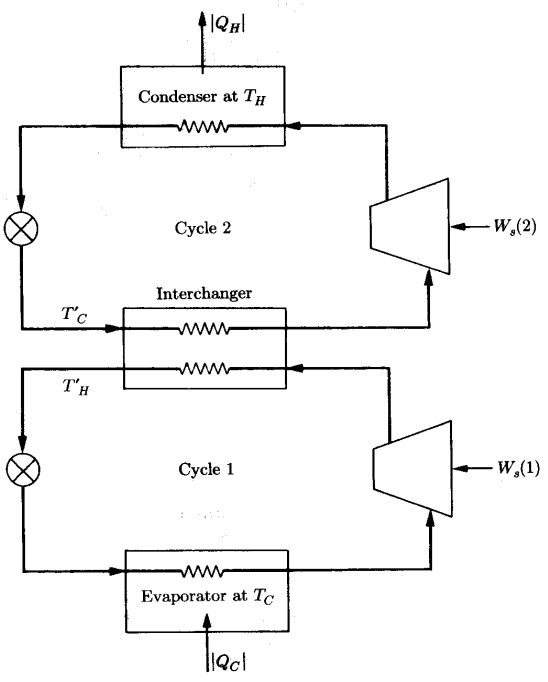


그림. 2 A two-stage cascade refrigeration system

## Absorption Refrigeration

증기-압축 냉동공정에서 냉동에 필요한 일은 전기에너지로부터 얻어지며 이 전기 에너지는 다시 열에너지를 통해서 얻어집니다. 그러므로 필요한 에너지를 일이 아닌 직접 열의 형태로 공급하고자 하는 연구가 이루어 졌습니다. 이러한 냉동공정을 흡수-냉동 공정이라고 합니다.(그림. 3)

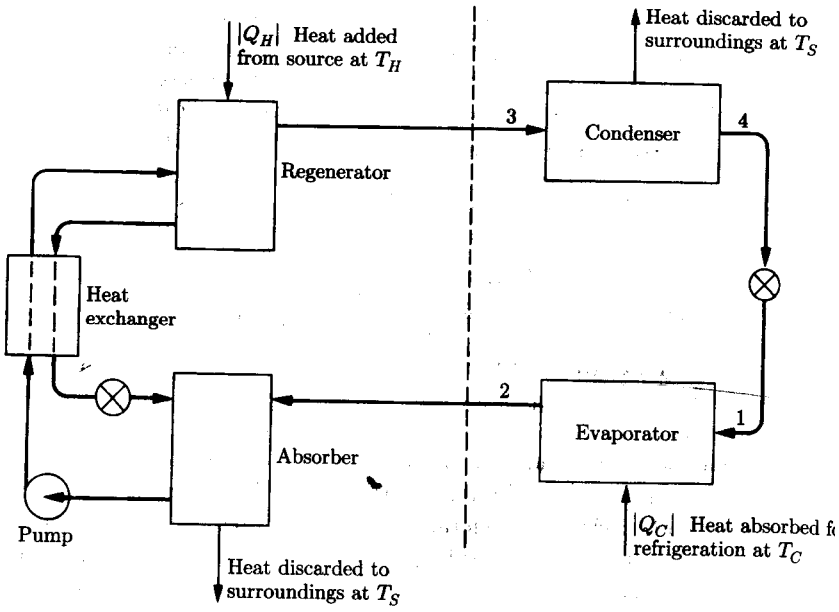


그림. 3 흡수-냉동 장치의 단면도

이 흡수-냉동 공정이 Carnot Cycle로 움직인다면, 필요한 일 W와 흡수한 열 $|Q_C|$는 다음과 같은 관계를 가집니다.

▪ $T_C$에서 열을 흡수하고 주위온도 $T_S$로 열을 방출하는 경우

$W = \frac{T_S - T_C}{T_C} |Q_C|$ 가 됩니다.

▪ $T_H$에서 열을 흡수, W라는 일을 하고 주위온도 $T_S$로 열을 방출하는 경우

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} = 1 - \frac{T_S}{T_H} (\because |Q_H| = |W| \frac{T_H}{T_H - T_S})$$

가 됩니다. 그러므로 Evaporator에서 흡수하는 열 $|Q_C|$와 W대신 열의 형태로 흡수한 에너지 $|Q_H|$는 다음과 같은 관계를 가집니다.

$$|Q_H| = |Q_C| \frac{T_H}{T_H - T_S} \frac{T_S - T_C}{T_C}$$

흡수-냉동 공정의 작동 순서는 다음과 같습니다.

증발기에서 $|Q_C|$라는 열을 흡수하여 냉매를 증발시켜, 증기상태로 absorber로 보낸다.

↓

Absorber에서 증기상태의 냉매는 낮은 온도에서 비교적 증발하지 않는 액상의 용매에 흡수된다.

↓

Absorber에서 나온 액체 용액은(비교적 냉매의 조성이 높다.) 펌프를 통해 응축기의 압력으로 압축되어 Regenerator로 들어간다.

↓

Regenerator에서 액체용액은 흡수한 열 $|Q_H|$를 통해 냉매증기와 용매로 분리된다.

↓

남은 용매는 다시 absorber로 전달된다.

## The Heat Pump

열펌프는 여름에는 건물내부를 냉각하고 겨울에는 건물내부에 열을 공급하는 장치입니다. 겨울에는 외부로부터 일을 흡수하여 건물내로 열을 방출합니다.

열은 그 자신만으로는 온도가 낮은 곳에서 온도가 높은 곳으로 이동이 불가능하며, 열의 이동에는 반드시 일(Work)이 소요됩니다. (물)펌프가 물을 낮은 위치에서 높은 위치로 퍼올리는 기계라는 의미와 마찬가지로, 열펌프란 열을 온도가 낮은곳에서 온도가 높은곳으로 이동시킬 수 있는 장치를 의미합니다. 사이클의 구성과 작동방법은 냉동기와 같으며 단지 저온열의 사용을 목적으로 하는 경우에는 냉동기, 고온열의 사용을 목적으로 하는 경우에는 열펌프(Heat Pump)가 됩니다.

열펌프는 열을 흡수하고 방열하는 원리의 구분에 따라 압축식, 화학식, 흡수식, 흡착식등으로 분류되며, 그중 가정용으로 많이 적용되는 형식은 압축식 열펌프입니다. 이 압축식 열펌프는 에어콘이라 불리우는 냉방장치의 역사이클로 생각하면 됩니다. 즉 냉방전용의 에어콘은 실내에 설치된 실내기의 열교환기에서 열을 흡수하여 실외에 설치된 실외기의 열교환기를 이용하여 열을 방열시키는 원리이며, 열펌프는 반대로 실외기의 열교환기에서 열을 흡수하여 실내에 설치된 실내기의 열교환기를 이용하여 열을 방열시키는 원리입니다. 일반적으로 저온부 열교환기인 증발기는 실외에 설치되며, 고온부 열교환기인 응축기 실내에 설치됩니다. 저온부 증발기는 실외에 설치되어 주변에서 열을 흡수하게 되며(열원이라 하며 가정용으로는 공기가 일반적으로 많이 적용된다), 고온부 응축기는 실내에 설치되어 주변으로 열을 방출(히트싱크라 하며 공기가 일반적으로 많이 적용된다)하여 난방에 사용하게 됩니다.

## Liquefaction Processes

액체는 같은 질량에 대해 기체보다 훨씬 작은 부피를 가집니다. 그러므로 수송 시 기체보다 훨씬 비용이 적게 듭니다.

기체를 액체로 만드는 것을 액화공정(Liquefaction Processes)이라고 하며 크게 3가지 방법을 통해 이루어집니다.

1. 일정압력에서 열 교환을 통해서
   - 즉 기체가 냉각되는 온도보다 더 낮은 온도를 가진 Heat Sink가 필요함. 보통 액화를 위한 것이라기보다는 액화하기 전 precooling을 위해 사용됨.
2. 일이 얻어지는 터빈에서의 팽창을 통해서
3. 조름공정(throttling)을 통해서
   - 압력이 높고 온도가 충분히 낮은 경우에 가능함
   - 작은 단위의 상용 액화 공장에서 사용됨

각 방법을 통한 액화공정의 실례는 그림. 4에 있습니다.

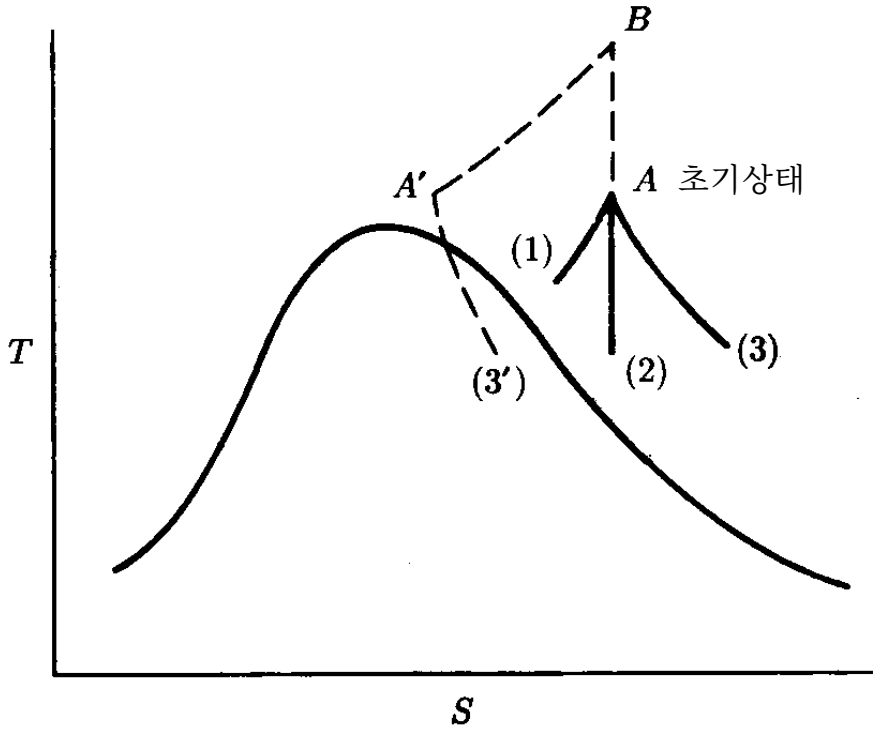


그림. 4 TS선도에서의 냉각 공정

그림. 4에서 A는 현재 냉각하고자 하는 기체의 초기 상태입니다.

(1) : 일정압력에서의 열 교환을 통해 액화하는 과정
압력이 일정할 때에는 $dH = TdS + VdP = TdS = C_p dT$ 가 성립하므로 S가 증가하면 T도 증가함을 알 수 있습니다. 그러므로 열 교환 시 온도가 감소하면 엔트로피도 감소하므로 남서쪽으로 움직입니다. 온도가 감소할 때 제일 가깝게 포화기체선도에 가깝게 가게 됩니다.

(2) : 일이 얻어지는 터빈에서의 팽창을 통해서
터빈에서의 팽창은 주로 isentropic하게 이루어 집니다. 그러므로 이 공정을 전후로 엔트로피 변화량은 없게 됩니다.
그러므로 A라는 점에서 팽창을 하면 수직으로 내려가기 때문에 과열기체는 포화액체 + 포화기체의 혼합물로 존재할 수 있습니다.

(3) : 조름공정은 일정한 엔탈피에서 일어납니다. 또한 압력이 감소하기 때문에 $dH = TdS + VdP = 0$ 이므로 압력이 감소하면 엔트로피는 증가하며 또한 온도도 감소하게 됩니다. 그러므로 동남쪽으로 움직이게 됩니다. 이런 경우에는 다음과 같이 미리 다른 공정을 사용한 후 조름공정을 사용하면 냉각시킬 수 있습니다.

A -B : Compression을 하여 B상태로 기체를 만든다.
B -A' : 일정한 압력에서 냉각하여 온도를 떨어뜨린다.
A' -(3') : isenthalpic expansion(throttling process)를 하면 (3')의 위치에 도달하게 된다.

## Linde Process

위의 원리를 이용하여 superheated된 vapor를 액화시키는 공정이 Linde Process입니다.(그림. 5)

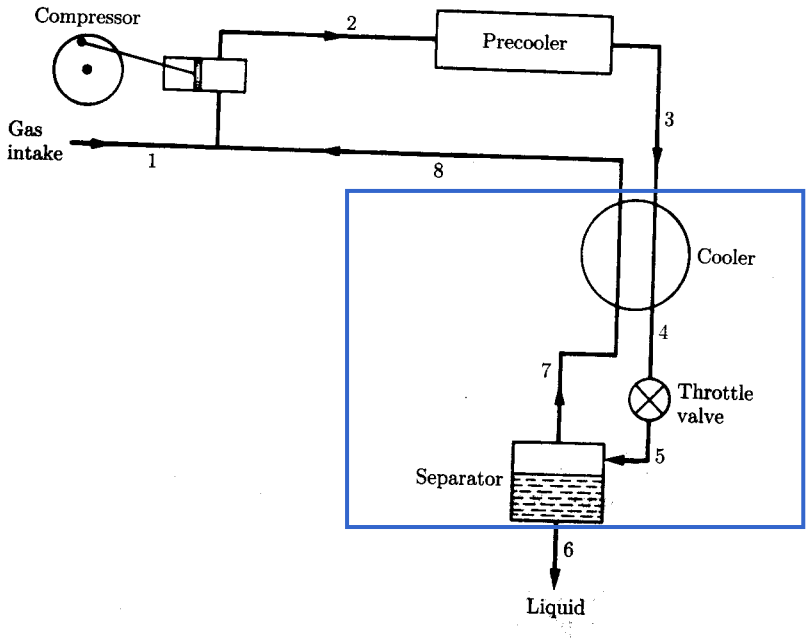


그림. 5 Linde Liquefaction process.

1 -2 : Vapor의 압축
2 -4 : 일정압력에서 Vapor의 냉각
4 -5 : Throttle valve를 통한 엔탈피를 일정하게 유지하면서 액화

그림. 5에서 보듯이 Cooler와 Throttle valve 그리고 Separator를 하나의 계로 보고서 에너지 수지식을 세우면 다음과 같습니다.

정상상태(Steady -States일 때) 조건에서

$H_6z+H_8(1-z)=H_3$ ( z : 액화된 분율 )

이 됩니다.($H_6$,$H_8$,$H_3$의 값을 알면 z를 구하게 됩니다.)

## Claude Process

Linde Process에서 Throttle valve를 쓴 것과 달리 expansion engine을 쓴 엔진입니다. (그림. 6)

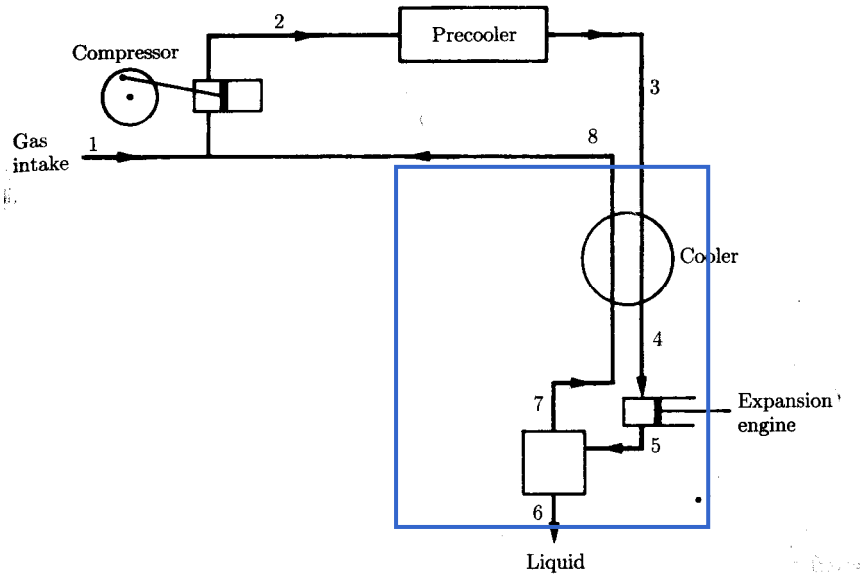


그림. 6 Claude liquefaction process

Expansion에서 한 일을 $W_s$라면

$$H_6 z + H_8(1-z) - W_s = H_3$$

가 됩니다. 엔진이 단열상태로 움직인다면 $W_s=(H_5-H_4)$가 되어 z를 구할 수 있습니다.