

## 냉동사이클에 대하여

조 성 환\*

냉동사이클은 外部로부터 動力을 공급받아서 低温體로부터 高温體로 熱을 傳達하는 사이클이다. 냉동사이클에서 利用되는 熱量은 주로 低温體로부터 吸收되는 熱量이며, 이것을 냉동효과라고 부른다. 냉동사이클이 暖房用으로 使用되는 경우에는 高温體로 放出되는 熱量이 利用되며 熱펌프라고 부른다. 熱力學第2法則에 依하면 熱은 低温體에서 高温體로 저절로는 흐를 수 없으며 반드시 外部로부터 일이 공급되어야 한다. 熱機關의 性能을 比較할 때 熱效率이 사용되며, 냉동사이클에 대해서는 냉동효과와 動力人力의 比, 냉동機의 動作係數(COP)가 使用된다. 動作係數가 클수록 效果의이다.

여기서는 냉동機의 機械의 原理에 대해서는 취급하지 않으며, 蒸氣壓縮冷凍, 吸收冷凍 및 熱電冷凍의 熱力學的 原理에 대해서만 간단히 설명한다.

### 逆카르노사이클

카르노사이클이 動力사이클의 比較의 標準이 되는 것과 같이 냉동사이클에서는 逆카르노사이클이 두개의 熱저장소사이에서 作動되는 냉동사이클중에서 가장 動作係數가 커서 比較의 기준이 된다.

逆카르노사이클은 다음과 같은 4개의 可逆過程으로 구성된다. (그림 1)

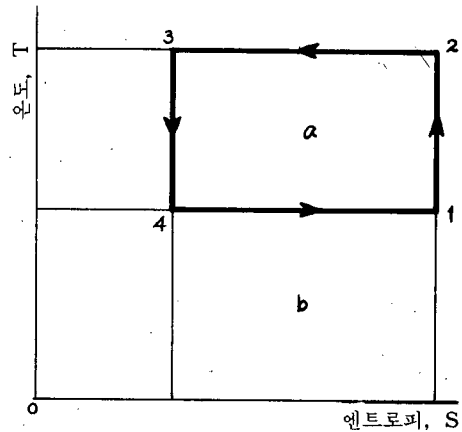
(1) 等溫膨脹 4-1 : 이 과정에서 熱(冷동효과)은 冷동시키려는 空間으로부터 冷媒로 전달된다.

(2) 斷熱壓縮 1-2 :

(3) 等溫壓縮 2-3 : 이 과정에서 熱은 冷媒로부터 大氣中으로 放出된다.

(4) 斷熱膨脹 3-4 :

그림 1에서 면적 (b)는 냉동효과를 나타내고,



[그림 1] 逆카르노사이클의 온도-엔트로피 선도

면적 (a)는 한 사이클에서의 入力참일을 나타내며, 면적 (a + b)는 大氣로 放出된 熱量이다. 따라서 COP는 면적비 (b/a)로 나타낼 수 있다. 逆카르노사이클의 COP는 冷동하려는 空間의 絕對溫度  $T_R$ 과 大氣의 絕對溫度  $T_0$ 의 函數로 표시될 수 있다.

$$COP = \text{冷동效果} / \text{入力참일}$$

$$= \frac{Q_i}{Q_o - Q_i} = \frac{T_R \Delta S}{T_o \Delta S - T_R \Delta S}$$

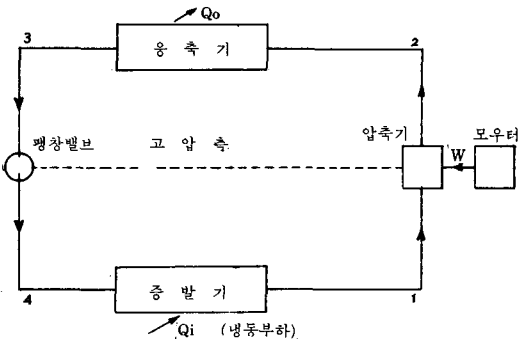
$$= \frac{1}{\left(\frac{T_o}{T_R} - 1\right)} \dots \dots \dots (1)$$

무시될 수 있는 정도의 溫度差사이에서 熱傳達가 일어난다는 理想的인 條件과 可逆過程이라는 條件에서 벗어나면 냉동사이클의 入力일은 增加된다. 그런 경우 有效에너지의 감소를 가져오며 엔트로피가 生成된다. 入力참일의 增加는 有效에너지의 감소의 합과 같으며, 또 주위의 絕對溫度와 엔트로피生成의 곱  $T_o \Delta S_p$ 와 같으며, 이 값을 非可逆性이라고 한다.

\* 正會員, 육군사관학교

理想的 基本蒸氣壓縮 冷凍사이클

그림 2 는 蒸氣壓縮冷凍사이클의 블럭선도이며, 그림 3 과 4 는 각각 壓力-엔탈피선도 및 溫度-엔트로피線圖이다. 이 基本사이클은 最少의 部品, 즉 각각 하나씩의 壓縮機, 膨脹밸브, 凝縮器 및 蒸發器로 구성된다. 理想사이클에서는 凝縮器와 蒸發器에서의 壓力損失이 없으며, 壓縮機에서의 過程이 可逆斷熱(等엔트로피) 過程이고 또 膨脹밸브에서 斷熱過程이라고 생각한다. 또한 이들 部品들을 연결하는 管路에서 壓力損失이나 熱傳達이 없다고 假定한다. 이 사이클에서 冷媒는 蒸發器를 低壓, 低溫의 飽和蒸氣상태 1로 나와서 壓縮機에서 可逆斷熱의 으로 壓縮되어 高溫, 高壓의 過熱蒸氣상태 2로 凝縮器에 들어간다. 凝縮器에서는 一定한 壓力하에서 熱을 放出하여 飽和蒸氣狀態를 거쳐 凝縮된다. 高壓의 飽和液體狀態 3에서 冷媒는 膨脹밸브를 통해 非可逆斷熱의 으로 膨脹되어 低壓, 低溫의 濕蒸氣狀態 4로 된다. 이 膨脹過程을 드로틀과정이라고 하며, 엔탈피가 일정한 過程이다. 濕蒸氣는 蒸發器에서 一定한 壓力하에서 飽和蒸氣狀態 1까지 증발되어 사이클이 完成된다. 蒸發器로의 熱傳達과 凝縮器로부터의 熱傳達は 熱을 吸收 또는 放出하는 流體사이클에 有限한 溫度差異가 없는 것으로 가정한다.



[그림 2] 기본증기압축냉동사이클의 블럭선도

各 部品에 대해 定常流에너지方程式을 對入하면

$$1-2 \text{ 壓縮機} : W_{1-2} = -(i_2 - i_1) \dot{m} \dots\dots(2)$$

$$2-3 \text{ 凝縮器} : Q_{2-3} = -(i_2 - i_3) \dot{m} \dots\dots(3)$$

$$3-4 \text{ 膨脹밸브} : i_3 = i_4 \dots\dots\dots(4)$$

$$4-1 \text{ 蒸發器} : Q_{4-1} = (i_1 - i_4) \dot{m} \dots\dots\dots(5)$$

여기서  $i$ 는 比엔탈피(單位質量당의 엔탈피),  $\dot{m}$ 은 冷媒의 質量流量,  $Q$ 는 熱傳達量,  $W$ 는 動力이다.  $Q$ 는 冷媒가 熱을 받을 때를  $+$ 로,  $W$ 는 冷媒가 주위에 대해 일을 할 때를  $+$ 로 생각한다. 즉  $W$ 가  $-$ 이면 冷媒가 주위로부터 일을 받는 것을 의미한다. 定常流에너지 方程式에서 運動에너지와 位置에너지는 무시되었다. 마찰을 작게 하기 위하여 보통 流速은 작게 하며, 또 冷凍系統에서 高度變化는 작으므로 무시될 수 있다. 系가 사이클을 이루기 때문에 凝縮器에서 放出된 熱量은 蒸發器에서 吸收한 熱量과 壓縮일을 합한 값과 같다.

이 冷凍사이클에서 動作係數는

$$COP = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1} \dots\dots\dots(6)$$

實際 基本蒸氣壓縮冷凍사이클

그림 3 과 4 에 도시된 이상적 기본증기압축 냉동사이클에서 理想的이라고 해도 다음과 같은 2가지의 非可逆性을 갖고 있다.

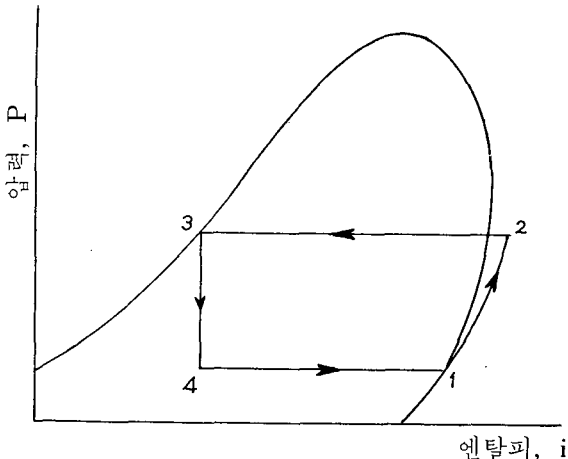
(가) 膨脹밸브에서의 根本的인 非可逆性

(나) 凝縮器에서 過熱蒸氣가 冷却되는 동안의 有限한 溫度差를 통한 熱傳達

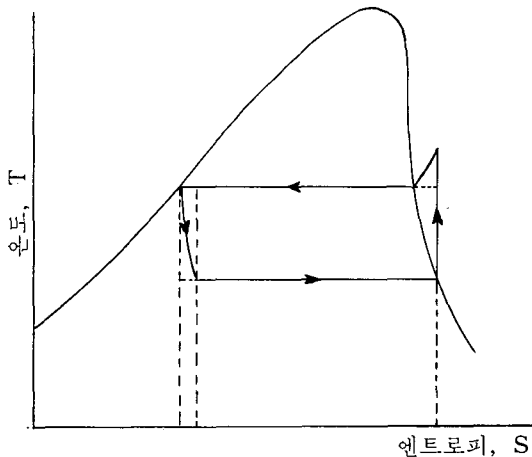
첫째의 非可逆性을 除去하기 위해서는 膨脹밸브를 다른 可逆斷熱的 膨脹機關으로 대체할 수 있으며, 이 機關의 出力일은 사이클의 入力일의 一部로 사용할 수 있다. 이 過程은 그림 4 의 3-4'로 표시된다. 둘째 비가역성을 제거하려면, 그림 4의 압축과정 1-2를 2개의 部分 즉 可逆斷熱(等엔트로피)壓縮 1-2'와 可逆等溫壓縮 2'-2''로 대체하여야 한다. 이 경우 動作係數는 약간 증가되나 이러한 장치의 複雜性 때

문에 실제로 응용되지는 않고 있다.

大型冷凍시스템에서는 그림 2의 基本蒸氣사이클에서보다 여러개의 壓縮機, 蒸發器, 膨脹밸브 및 flash chamber를 포함할 수도 있다.



[그림 3] 증기압축냉동사이클의 압력-엔탈피 선도



[그림 4] 증기압축냉동사이클의 온도-엔트로피 선도

吸收冷凍사이클

吸收冷凍사이클에서는 二次流體(吸收劑)를 사용하여 蒸發器에서 증발된 一次流體(氣體冷媒)를 吸收하게 한다. 이 사이클은 機械的(蒸氣壓縮) 冷凍사이클과 熱機關사이클을 組合한 것과 比較될 수 있다. 그림 5와 6은 두 사이클의 간단한 블록선도이다. 두 사이클의 유사성을 비교

하면 다음과 같다.

(가) 發生器와 보일러: 吸收冷凍에서는 高熱源에서 열이 발생기로 전달되고, 組合方式에서는 熱이 보일러로 전달되어 고압의 증기를 발생한다.

(나) 凝縮器와 冷媒凝縮器: 吸收方式의 凝縮器 및 組합방식의 冷매응축기로부터 중간온도의 熱沈으로 熱이 傳達되어 비교적 高壓에서 冷媒가 凝縮된다.

(다) 蒸發器와 蒸發器: 두 방식에서 低溫의 熱源에서 열이 蒸發機로 전달되어 그 結果 비교적 低壓에서 冷매가 증발된다.

(라) 吸收器와 熱機關凝縮器: 吸收方式의 吸收器와 組합방식의 熱機關凝縮器로부터 中間溫도의 熱沈으로 열이 방출되어 비교적 低壓의 증기가 액체상태로 변환된다.

(레) 溶液펌프와 給水펌프: 吸收方式의 溶液펌프의 組합방식의 給水펌프에 약간의 일이 공급되어 액체를 가압한다.

吸收方式에서는 組합방식의 터빈(또는 기타 膨脹機關)에 대응되는 部品는 없다.

카르노사이클로 作動되는 理想熱機關에 대한 일과 열의 관계는 열역학제 2 법칙에 의하여

$$W = Qg \frac{T_h - T_s}{T_h} \dots\dots\dots(7)$$

여기서

W : 動力, kcal/h (또는 Kw)

Qg : 熱供給率, kcal/h (또는 Kw)

T<sub>h</sub> : 熱源의 절대온도, K

T<sub>s</sub> : 熱沈의 절대온도, K

역카르노사이클로 作動되는 理想冷凍機의 冷凍負荷와 供給動力사이의 관계는

$$-W = Q_e \frac{T_s - T_e}{T_e} \dots\dots\dots(8)$$

여기서

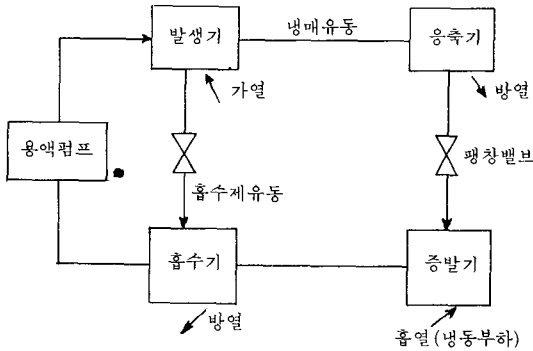
-W : 供給動力, kcal/h (또는 Kw)

Q<sub>e</sub> : 冷凍負荷, kcal/h (또는 Kw)

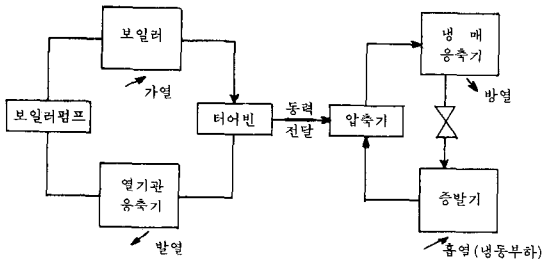
$T_e$  : 냉동부하의 절대온도, K  
 이 두 理想사이클의 組合에 대한 動作係數는

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{T_e(T_h - T_s)}{T_h(T_s - T_e)} \dots\dots (9)$$

이 式은 理想的 吸收冷凍사이클에도 적용된다. 기본흡수냉동사이클에서 저압의 冷媒蒸氣는 低壓의 液體溶液으로 變換된다. 이것은 冷媒蒸氣가 吸收劑에 흡수되므로써 가능하게 된다. 냉매-흡수제 용액은 溶液펌프에 의해 加壓된다. 용액의 체적이 冷媒蒸氣의 체적보다 훨씬 작기 때문에 용액펌프에 필요한 動力은 기계적 냉동사이클에서 필요한 압축일보다 작다. 냉매-흡수제 용액은 發生기로 보내져서 거기서 냉매와 흡수제가 분리된다. 증류과정에 의하여 冷媒蒸氣가 發生된다.



[그림 5] 기본흡수냉동사이클



[그림 6] 열기관과 기계적 냉동사이클의 조합

그림 5에서 볼 수 있듯이 冷媒와 吸收劑는 回路가 다르다. 冷媒는 發生器에서 凝縮器, 蒸發器, 吸收器를 거쳐 溶液펌프에 의해 다시 發生器로 돌아온다. 吸收劑는 發生器에서 凝縮器와 蒸發器

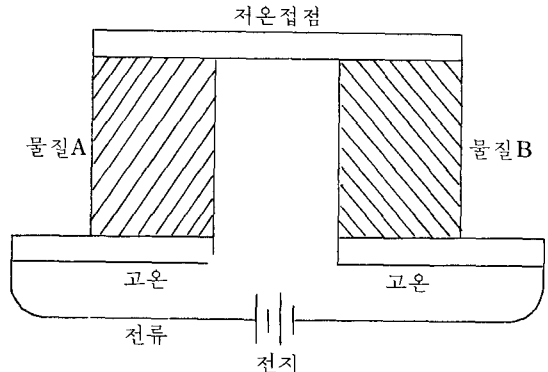
를 거치지 않고 發生器에서 直接 吸收器로 간다. 吸收劑는 사용된 冷媒를 低壓側에서 高壓側으로 운반하는 역할을 한다.

실제 흡수냉동사이클에서는 고온의 흡수제가 發生기에서 흡수기로 운반되는 동안 낭비되는 열에너지를 열교환기를 사용하여 發生기로 들어가는 용액을 예열시키는데 이용한다.

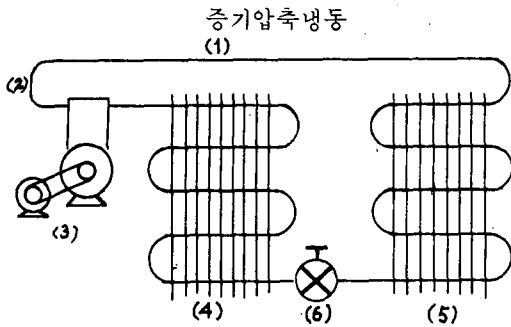
熱電冷凍

서로 다른 2개의 金屬으로 된 폐쇄회로에서 두 接點의 온도를 다르게 유지하면 電流가 흐른다. 이 현상을 Seebeck 效果라고 한다. 또 반대로 만약 2개의 서로 다른 金屬으로 된 회로에 電流를 흐르게 하면 接點에서 熱이 흡수되거나 또는 放熱된다. 이 현상을 Peltier 效果(그림 7)라고 한다. 單一傳導體에서 흡수되거나 방출되는 열량은 그 전도체에 있는 온도구배와 전류에 관계되며 이 效果를 Thomson 效果라고 부른다. 그러나 熱電冷凍의 재료에서 Thomson 效果는 오차적이며 Peltier 效果와 Seebeck 效果가 중요하다. 이 熱電效果는 溫度測定에만 주로 利用되었으나 트랜지스터 및 기타 半導體裝置의 개발에 의해 熱電效果가 큰 재료를 개발하여 冷凍에도 이용하게 되었다.

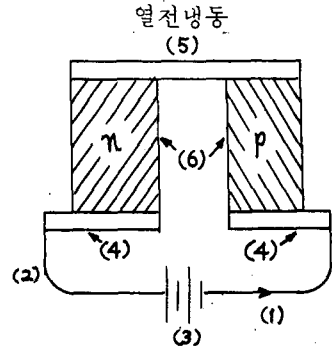
熱電冷凍시스템의 作動原理와 이해를 돕기 위해 증기압축냉동시스템과 열전냉동시스템의 유사성에 관해 그림 8에 도시되어 있다. 두 시스템



[그림 7] Peltier 효과



1. 냉매가스
2. 기밀투우브
3. 모우터-압축기
4. 응축기
5. 증발기
6. 드로틀밸브



1. 전자가스
2. 전도체
3. 전 지
4. 고온접점
5. 저온접점
6. 에너지레벨관계

[그림 8] 증기압축냉동과 열전냉동의 상사성

펌의 作動에서 關鍵은 시스템의 高溫쪽과 低溫쪽의 内部에너지의 變化를 얻는 수단을 마련하는 것이다. 증기압축냉동사이클에서는 응축기와 증발기사이의 트로틀밸브가 이것을 가능하게 한다. 트로틀밸브가 없다면 냉매는 전체 시스템에 걸쳐 균일한 압력과 엔탈피를 갖게 되며 熱 펌프作用은 일어나지 않는다. 熱電冷凍사이클에서는 n-물질과 p-물질이 같다면 電子가스의

에너지레벨은 전체 시스템에 걸쳐 똑같이 되어 열 펌프作用이 없게 된다. 유효전자에너지레벨이 서로 다른 재료를 사용하여 전자가스가 接點을 통과하여 흐를 때 에너지 變化를 가져와서 電流의 方向에 따라 接點에서 熱을 吸收 또는 放出하게 된다.

(本 내용은 ASHRAE HANDBOOK, 1972 FUNDAMENTAL에서 발췌한 것임)