◀ 解 說 ▶

冷凍過程의 엑세르기 損失

李 昌 植*

I. 序 言

엑세르기(Exergie)는 1956年 독일의 VDI[1] 에서 정식 용어로 採用된 以來 有効에너지의 概念으로 使用되어 왔다.

엑세르기概念은 排熱回收의 檢討, 低温工程의 解析, 排氣熱의 長距離輸送, 熱펌프暖房, 脫水, 乾燥過程의 解析, 熱設備의 能力 등에 適用할 수 있으며, 特히 冷凍機의 成績係數의 값을 算定하기 위해서는 熱力學的 非可逆要素에 바탕을 둔 엑세르기損失을 考慮하여 計算하여야 한다.

에너지 中에는 内部에너지나 熱에너지와 같이 그 一部를 工學的으로 利用하여 다른 形態로 옮겨지는 에너지와 摩擦과 같이 消費되어서 엔트로피의 增加로 되어 利用할 수 없는 에너지, 즉 일損失로 되는 것이 있다. 이와 같은 경우 利用할 수 있는 에너지의 概念은 1830年 頃부터 Carnot, Thomson 등에 의하여 主로 熱量에 대하여 생각하였고, 19世紀後半부터 内部에너지에 대하여 Maxwell, Gibbs 등에 의하여 硏究되었고, 그 후 Rant[2]에 의하여 最大工學일을 엑세르기라 부르게 되었다. 지금까지 우리가 取扱하는 諸現象은 摩擦이나 熱傳導, 熱輻射 등을 포함하는 非可逆過程이고 여기서 消費되는 에너지가 非可逆性理論의 支配를 받는 것은 周知의 事實이다.

冷凍工學에서는 지금까지 主로 에너지保存의 法則인 熱力學의 第 1法則에 의하여 熱에너지가 일로 轉換됨을 설명하여 왔으나 에너지의 消費에 관한 第 2法則에 대하여는 그다지 系統的인 考慮를 하지 않고 있다. 이러한 意味에서 工學的일量과 第 2法則에 입각한 엑세르기概念을 설명하고, 이 概念을 冷凍過程에 適用하기 위한理論的背景과 엑세르기損失에 대하여 記述하고자 한다.

* 正會員, 漢陽大學校 工科大學

II. 工学的일과 엑세르기概念

2-1 工学的일과 엑세르기

지금 狀態 1과 2사이에서 熱力學 第1法則은 다음 式으로 表示된다.

$$ {}_1q_2 = u_2 - u_1 + {}_1w_2 \tag{1}$$

여기서 ${}_1q_2$는 系內로 가해진 熱量, u는 內部에너지, w는 일을 표시한다.

또한 위의 式에서 일 ${}_1w_2$는 摩擦에 의한 일 ${}_1w_{R2}$와 體積變化에 의한 일 $\int_1^2 pdv$로 나누어 생각할 수 있다.

$$ {}_1w_2 = \int_1^2 pdv - |{}_1w_{R2}| \tag{2}$$

다만, ${}_1w_{R2} \leqq 0$

따라서 速度 c일 때의 運動에너지와 높이 z 되는 位置에너지를 考慮한 開放過程에 對한 全일量 ${}_1w_2{}^*$는

$$ {}_1q_2 - {}_1w_2{}^* = u_2 - u_1 + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \tag{3}$$

지금 이 系內의 工業일을 ${}_1w_{t2}$라 하면 全일量 ${}_1w_2{}^*$는 다음 式으로 表示된다.

$$ {}_1w_2{}^* = {}_1w_{t2} + (p_2v_2 - p_1v_1) \tag{4}$$

式 (3)과 (4)로부터

$$ {}_1q_2 - {}_1w_{t2} = u_2 - u_1 + (p_2v_2 - p_1v_1) + \frac{1}{2}\times(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1)$$

여기서 $h = u + pv$이므로

$$ {}_1q_2 - {}_1w_{t2} = h_2 - h_1 + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \tag{5}$$

또한 엔트로피定義를 생각하면

$$ Tds = du + pdv = dh - vdp \tag{6}$$

따라서

$$ \int_1^2 Tds = u_2 - u_1 + \int_1^2 pdv = h_2 - h_1 - \int_1^2 vdp \tag{6a}$$

第1法則을 고려 하면

密閉系의 過程에서는

$$_1q_2 + |_1w_{R2}| = u_2 - u_1 + \int_1^2 p\,dv$$

開放系의 過程에서는

$$_1q_2 + |_1w_{R2}| = h_2 - h_1 - \int_1^2 v\,dp$$

따라서 熱量은

$$_1q_2 + |_1w_{R2}| = \int_1^2 T\,ds \qquad (7)$$

또 工學的일은 準靜的으로 可逆過程이 維持될 때가 最大가 되므로 Fig 1에서 A의 狀態로부터 速度 c=0 되는 u의 狀態로 移動하는 過程을 생각할 경우 먼저 準靜的으로 A로부터 斷熱可逆的으로 B로 變化하고 다음에 B에서 等温可逆變化로 u로 移動할 때의 全工業일 $(w_{tAB})_{rev}$는 式(5)로부터

$$(w_{tAB})_{rev} = h_A - h_B + \frac{1}{2}(c_A^2 - c_B^2) + g(z_A - z_B)$$

또 B에서 c=0 되는 u로 等温可逆變化할 때의 일量 $(w_{tBU})_{rev}$는

$$(w_{tBu})_{rev} = h_B - h_u + \frac{1}{2}c_B^2 + g(z_B - z_u) + T_u(s_u - s_B)$$

따라서 工學的일의 最大値 A_t는

$$a_t = (w_{tAB})_{rev} + (w_{tBu})_{rev}$$

$$= h_A - h_u - T_u(s_A - s_u) + \frac{1}{2}c_A^2 + g(z_A - z_u) \qquad (8)$$

따라서 一般으로 狀態 1에서 2의 狀態로 變化할 때의 일의 最大値는

$$a_{t2} - a_{t1} = h_2 - h_1 - T_u(s_2 - s_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \qquad (9)$$

가 된다. 여기서 다음 式으로 表示되는 e의 값을 엑세르기라 하면

$$e = h - h_u - T_u(s - s_u) \qquad (10)$$

工學的 最大일 a_t는

$$a_t = e + \frac{1}{2}c^2 + g(z - z_u) \qquad (11)$$

卽, 運動 및 位置에너지를 考慮하지 않은 工學的最大일과 엑세르기는 同一한 것이 된다. T-S 圖表에서는 엑세르기는 $s < s_u$, $s > s_u$의 2가지 경우에 대하여 表示하면 Fig 2와 같다. 즉, 定壓線 p=一定의 線으로 表示된 部分 아래의 面積이 $h - h_u$를 表示하고, s=一定과 T_u=一定 및 s_u=一定에 의하여 둘러싸인 면적이 $T_u(s_u - s)$가 된다. 이들의 合이 엑세르를 表示한다. 또 後者의 $T_u(s - s_u)$는 아네르기(Anergie)를 表示한다.

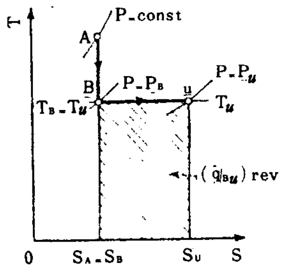

Fig.1 最大일의 計算過程

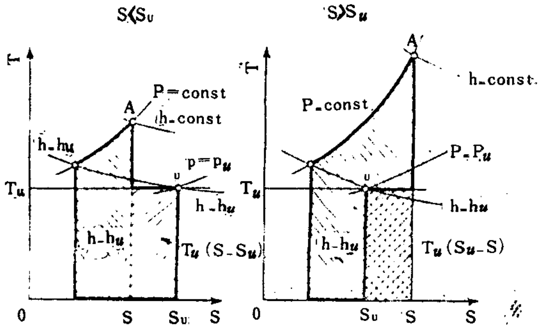

Fig.2. T-s 線圖의 엑세르기 $e = h - h_u - T_u(s - s_u)$

2-2 熱量의 엑세르기

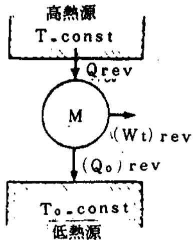

Fig. 3 高低熱源 사이에서 作動하는 熱機關

Fig 3과 같이 高温 T_1 低温 T_0의 一定温度 熱源 사이에서 作動하는 熱機關을 생각하고 그 사이에서 하는 工學일을 w_t, 高熱으로부터 熱量 Q를 받고, 低熱源으로 Q_0를 주는 경우 이 過程을 準靜的過程이라 하면 熱力學의 第1法則에 依하여

$$(w_t)_{rev} = Q_{rev} - |(Q_0)_{rev}| \qquad (12)$$

全過程이 可逆變化이므로 第2法則으로부터

$$\sum \Delta s=\Delta s_1+\Delta s_2=0 \qquad (13)$$

따라서

$$\Delta s_1=-\frac{Q_{rev}}{T},\ \Delta s_2=\frac{|(Q_0)_{rev}|}{T_0}$$

$$\therefore -\frac{Q_{rev}}{T}+\frac{|(Q_0)_{rev}|}{T_0}=0 \qquad (14)$$

式 (14)를 (12)에 代入하여 $|(Q_0)_{rev}|$를 消去하면

$$\frac{(w_t)_{rev}}{T_0}=\frac{Q_{rev}}{T_0}-\frac{Q_{rev}}{T}$$

$$(w_t)_{rev}=Q_{rev}\left(\frac{T-T_0}{T}\right)$$

前述한 바와 같이 可逆的過程의 工業일이最大로서 엑세르기는

$$e_Q=Q\frac{T-T_0}{T} \qquad (15)$$

이 때 $\frac{QT_0}{T}$ 아네르기, 즉 엑세르기 損失이다.

$$e_v=\frac{T_0}{T}Q \qquad (16)$$

여기서 $\frac{T-T_0}{T}$를 Carnot Factor라 한다.

2-3 摩擦에 의한 엑세르기損失

Fig. 4와 같은 開回路에서 $_1q_2$의 熱量을 供給받아 工業的일 $_1w_{t2}$의 일을 하였다고 하면 周圍溫度 T_u일 때의 Carnot Factor $\eta_c=\frac{T-T_u}{T}$를 고려하면 最大일量 $_1a_{q2}$는

$$_1a_{q2}=\int_1^2\left(1-\frac{T_u}{T}\right)dq={}_1q_2-T_u\int_1^2\frac{dq}{T} \qquad (17)$$

Fig. 4에서 에너지 平衡을 생각하면 엑세르기損失 $_1e_{v2}$는

$$_1e_{v2}=a_{t1}-a_{t2}+{}_1a_{q2}-{}_1w_{t2} \qquad (18)$$

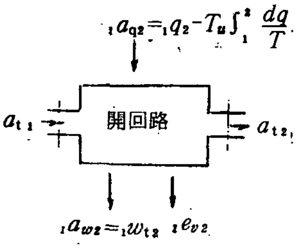

Fig. 4. 開回路에 對한 엑세르기損失

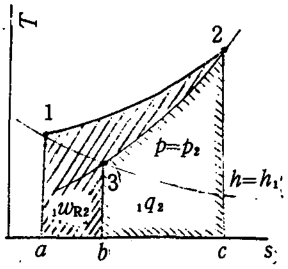

Fig. 5.

흐르고 있는 物質의 最大工學일은

$$a_{t1}-a_{t2}=-(h_2-h_1)+T_u(s_2-s_1)-\frac{1}{2}(c_2^2-c_1^2)-g(z_2-z_1)$$

實際로 한 工業일 $_1w_{t2}$는

$$_1w_{t2}=-[(h_2-h_1)+\frac{1}{2}(c_2^2-c_1^2)+g(z_2-z_1)]+{}_1q_2$$

따라서 엑세르기損失 $_1e_{v2}$는

$$_1e_{v2}=T_u(s_2-s_1)-T_u\int_1^2\frac{dq}{T} \qquad (19)$$

지금 摩擦에 의한 일을 $_1w_{R2}$라 하면 式 (6)에 依하여

$$_1q_2+|_1w_{R2}|=\int_1^2 Tds$$

$$\therefore\ dq=Tds-|dw_R|$$

$$\therefore\ {}_1e_{v2}=T_u(s_2-s_1)-T_u\int_1^2 ds+T_u\int_1^2\frac{|dw_R|}{T}$$

$$=T_u\int_1^2\frac{|dw_R|}{T} \qquad (20)$$

따라서 $$\frac{d\,_1e_{v2}}{|dw_R|}=\frac{T_u}{T} \qquad (21)$$

即, 摩擦에 의한 엑세르기損失은 溫度 T가 낮을 수록 커진다.

2-4 壓力降下에 依한 엑세르기損失

熱의 供給이 있고 摩擦이 있는 어느 管속의 흐름에서 速度變化를 무시하면

$$_1q_2=h_2-h_1$$

摩擦에 의한 壓力降下를 고려하면 式 (7)로부터

$$_1q_2=h_2-h-\int_1^2 vdp-|_1w_{R2}|=\int_1^2 Tds-|_1w_{R2}|$$

$$\therefore -\int_1^2 vdp=|_1w_{R2}| \qquad (22)$$

한편 式 (20)에서 摩擦에 의한 엑세르기損失 $_1e_{v2}$는

$$_1e_{v2}=T_u\int_1^2\frac{|dw_R|}{T} \qquad (23)$$

式 (22)와 (23)에서

$$_1e_{v2}=T_u\int_1^2\left(-\frac{v}{T}\right)dp$$

지금 理想氣體의 法則으로부터

$$_1e_{v2}=T_uR\int_{p_1}^{p_2}\frac{dp}{p}=-T_uR\ln\frac{p_2}{p_1}$$

$\Delta p=p_1-p_2$라 하면

$$_1e_{v2}=-T_uR\ln\left(1-\frac{\Delta p}{p_1}\right)=-T_uR_x\left(-\frac{\Delta p}{p}+\frac{\Delta p^2}{2p_1^2}-\cdots\cdots\right) \qquad (24)$$

따라서 第1次近似를 취하면

$$_1e_{v2}=T_uR\frac{\Delta p}{p} \qquad (25)$$

즉 壓力 p_1이 높으면 높을수록 壓力 降下 Δp는 커지게 되고, 또 完全가스이면 Fig. 5에서 1～3의 h=一定의 線이 水平이 되고, a～c의 값이 $R\ln\frac{p_2}{p_1}$에 相當한다. 만일, 周圍溫度 T_u가 T보다 낮으면 엑세르기損失은 摩擦에 의한 일보다 작아지게 된다.

2-5 노즐내의 膨脹 및 壓縮機에서의 엑세르기 損失

노즐에서 液體의 膨脹은 노즐前後의 運動에너지와 位置에너지를 무시하여도 큰 差가 없으므로 노즐前後의 最大工學일의 差는

$$a_{t2}-a_{t1}=e_2-e_1=h_2-h_1-T_u\,(s_2-s_1)$$

노즐에서는 $h_2=h_1$이므로

$$a_{t2}-a_{t1}=e_2-e_1=-T_u\,(s_2-s_1) \tag{26}$$

第2法則에 의하면 $s_2>s_1$이므로 式 (26)의 값은 (−)로 된다. 즉, 노즐에서는 유체는 그 곳을 通過할 때 자체가 갖는 最大일量의 一部를 희생한다. 따라서 노즐에 의한 엑세르기損失 ${}_1e_{v2}$는

$${}_1e_{v2}=T_u\,(s_2-s_1) \tag{27}$$

壓縮機의 경우 斷熱過程의 일量은

$$({}_1w_{t2})_{ad}=-[\,h_2-h_1+\tfrac{1}{2}(c_2^2-c_1^2)+g\,(\,z_2-z_1\,) \tag{28}$$

또 壓縮機內의 作業流體의 最大工學일의 變化量은

$$a_{t2}-a_{t1}=h_2-h_1-T_u\,(s_2-s_1)+\tfrac{1}{2}(c_2^2-c_1^2)+g\,(z_2-z_1) \tag{29}$$

따라서 式 (28)과 式 (29)로부터

$$({}_1w_{t2})_{ad}=a_{t1}-a_{t2}-T_u\,(s_2-s_1) \tag{29a}$$

斷熱過程의 非可逆變化에서는 $s_2>s_1$이고, $({}_1w_{t2})_{ad}$는 最大工學일 $(a_{t1}-a_{t2})$보다 작아진다. 즉, 이 경우에도 엑세르기損失 ${}_1e_{v2}$는 다음 式으로 表示된다.

$${}_1e_{v2}=T_u\,(s_2-s_1) \tag{30}$$

2-6 成績係數와 엑세르기損失

冷凍機의 成績係數 CP는 一般으로 凝縮器의 放熱量이 Q이고, 蒸發器의 吸收熱量 Q_0인 冷凍機에서 壓縮機가 w_t의 일을 하는 경우 CP=$Q_E/|w_t|$로 表示된다.

지금 周圍溫度를 T_u, 주어진 熱量 Q_0인 경우의 最大일 a_{Q0}는 Carnot Factor η_c를 고려하면

$$a_{Q_0}=\eta_c\,Q_0=(1-\frac{T_u}{T_0})\,Q_0 \tag{31}$$

一定溫度 T_0인 低溫室로부터 Q_0의 熱量을 除去할 경우 $T_u>T_0$이면 $(1-T_u/T_0)<0$로 되고 Q_0와 a_{Q_0}와는 방향이 逆으로 된다. 이 경우의 엑세르기는

$$a_{Q_0}=(1-\frac{T_u}{T_0})Q_0=\frac{T_u-T_0}{T}\,|Q_0| \tag{32}$$

실제의 冷凍機는 非可逆사이클이므로 엑세르기損失 e_v가 있고 그 값이 $T_u\Delta s_{irr}$가 된다. 즉, 工學的일量 w_t는 엑세르기 a_{Q_0}와 아네르기 e_v와의 合이 된다.

$$|w_t|=a_{Q_0}+e_v=\frac{T_u-T_0}{T}|Q_0|+T_u\,\Delta s_{irr} \tag{33}$$

따라서 이 경우의 成績係數 CP는 다음 式으로 表示된다.

$$\mathrm{CP}=\frac{|Q_0|}{|w_t|}=\frac{T_0}{T_u-T_0}\,(1-\frac{T_u\Delta s_{irr}}{|w_t|}) \tag{34}$$

따라서 可逆的인 경우의 成績係數$(\mathrm{CP})_{rev}$는 $T_0/(T_u-T_0)$가 된다. 또 T_0가 시간적으로 변화하는 경우에는 그 平均値 T_m을 취하여 T_0로 바꾸어 놓을 수 있다.[3]

지금 이 冷凍機에서 冷却되는 低溫室을 생각하면 冷凍裝置로부터의 엑세르기 a_{Q_0}에 대한低溫室의 엑세르기損失, 즉 아네르기를 E_v라 하면

$$a_{Q_0}+E_v=Q_0 \tag{35}$$

앞에서 기술한 바와 같이 a_{Q_0}와 Q_0는 符號가 逆이므로

$$E_v=Q_0+|a_{Q_0}| \tag{36}$$

또 이 裝置로부터의 엑세르기損失은 e_v와 E_v의 合이므로

$$e_v+E_v=|w_t|+Q_0=Q \tag{37}$$

이들의 關係를 圖示하면 Fig.5와 같다.

2-7 蒸氣壓縮冷凍機의 엑세르기損失[4][5]

冷凍裝置의 非可逆性에 의한 엑세르기損失은 各損失 e_v의 總計로 생각할 수 있다. 따라서 冷凍過程中의 엑세르기損失을 求하여 이들을 合하면 된다. 이들 중에 主된 것은 熱交換器에 있어서의 有限溫度差의 非可逆性에 의한 손실과 壓縮, 膨脹, 壓力降下 등에서 생기는 摩擦에 의한

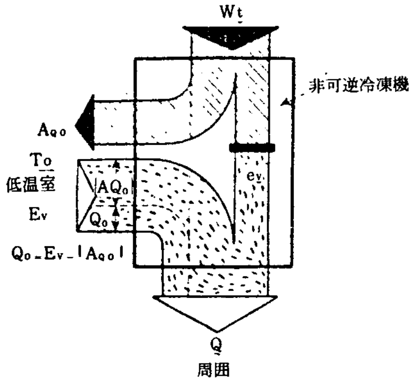

Fig. 6. 非可逆冷凍裝置의 엑세르기와 아네르기

것의 2가지가 있다.

지금 Fig. 7과 같은 蒸氣壓縮冷凍사이클의 T-s線圖上에 過程의 變化를 기입하고 각 부분에서 갖는 엑세르기損失을 檢討하면 Table 1과 같다.

蒸發室에서 Q_0의 熱量을 吸收하여 凝縮器에서 周圍에 Q의 熱量을 放散하고, 壓縮機의 所要일이 w_t인 冷凍機의 엑세르기損失 e_{q0}와 엑세르기損失 $\sum e_v$와의 관계를 圖示하면 Fig. 6과 같다.

Table 1. 冷凍機 各部의 엑세르기損失

장 소	e_v	T-s線圖上의面積	備 考
壓 縮 機	$T_u(s_2-s_1)$	s_1-s_2-6-7	
凝 縮 機	e_2-e_4	6-2-3-4-12-6	$\lvert{}_2q_4\rvert - T_u\times(s_2-s_4)$
膨脹밸브	$T_u(s_5-s_4)$	$s_4-s_5-11-12$	
蒸 發 器	$T_u\dfrac{T_0-T_L}{T_0T_L}q_0$	5-1-8-10-9-11-5	$(e_5-e_1)-e_{q0}=T_0\times(s_1-s_4)-q_0-e_{q0}$

다만, $q=\lvert{}_2q_4\rvert=q_0+w_t,\ w_t=e_{q0}+\sum e_v=\lvert{}_2q_4\rvert-q_0$

蒸發温度 −5°C (飽和壓力 3.62at), 凝縮温度 23°C (飽和壓力 9.61at)에서 壓縮機의 斷熱効率 $\eta_{sv}=0.78$일 때 주위온도와 같은 온도 15°C 1at의 물을 製氷의 原水 또는 冷却水로 使用하여 1 t/hr의 얼음을 만든다. 다만 冷却水量은 22 t/hr로 한다. 이 때의 엑세르기의 狀態를 圖示하여 보기로 한다.

0°C의 얼음을 만들기 위하여 제거해야 할 熱量 Q_0는 얼음의 量, 潛熱 및 물의 比熱을 각각

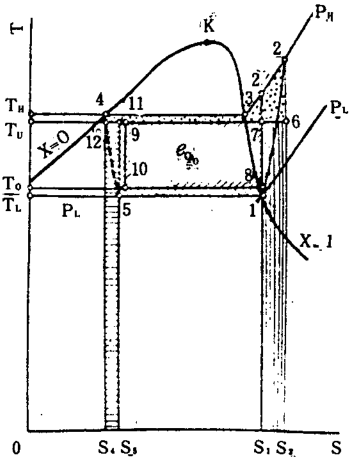

Fig. 7. 冷凍사이클의 $T-s$ 線圖와 엑세르기損失

G_E, r_E, C_w라 하면

$$Q_0=G_E(h_{wu}-h_E)=G_E[C_w(t_u-t_E)+r_E] \quad (38)$$

얼음의 엑세르기 e_E는

$$e_E=h_E-h_{wu}-T_u(s_E-s_{wu})=-r_E+c_w(t_E-t_u)-T_u\left(\frac{-r_E}{T_E}+c_w\ln\frac{T_E}{T_u}\right)$$

$$\therefore e_E=r_E\left(\frac{T_u}{T_E}-1\right)-c_w\left(t_u-t_E-T_u\ln\frac{T_u}{T_E}\right) \quad (39)$$

1시간의 製氷엑세르기 E_E는

$$E_E=G_E\,e_E \quad (40)$$

冷凍機의 냉매의 엑세르기를 결정하기 위하여 암모니아 特性表로부터 Fig. 8의 1, 2, 2', 4, 5에 相當하는 각 점의 温度, 壓力, 엔트로피를 구하여 $e=h-h_u-T_u(s-s_u)$를 구한다.

點 2에 대하여는 $h_2=h_1+(h_2'-h_1/\eta_{sv})$로부터 구한다. 각 점에서의 狀態値를 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2. 冷凍機사이클 主要點의 값

位置	t°C	P at	h kcal/kg	s kcal/kg°K	e kcal/kg	e kj/kg
1	-5.0	3.619	400.1	2.120	41.9	175
2	76.2	9.611	441.6	2.148	75.4	316
2'	61.3	9.611	432.5	2.120	74.3	311
4	23.0	9.611	125.8	1.090	64.4	270
5	-5.0	3.619	125.8	1.097	62.4	261
주위	15.0	1.000	416.7	2.323	0	0

냉매유량 G를 구하여 全體의 일量 w_t를 구한다.

$$G = \frac{Q_0}{h_1 - h_4}\ ,\ w_t = G w_t = G(h_2 - h_1) \qquad (41)$$

凝縮器의 冷却水의 出口温度 t_{wa}와 그 엑세르기를 e_{wa}라 하면

$$G(h_2 - h_4) = G_w (h_{wa} - h_{wu}) = G_w C_w (t_{wa} - t_u)$$

$$\therefore\ t_{wa} = t_u + \frac{G(h_2 - h_4)}{G_w C_w}$$

$$E_{wa} = G_w e_{wa} = G_w C_w \left[(t_{wa} - t_u) - T_u \ln \frac{T_{wa}}{T_u} \right] \qquad (42)$$

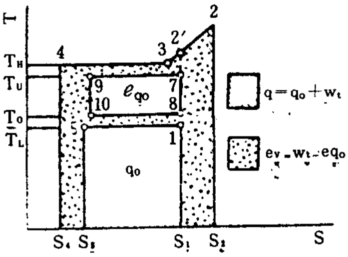

Fig. 8. 冷凍사이클의 T–S 線圖에서의 엑세르기損失과 일량.

Ⅲ. 結　　語

以上은 非可逆性을 고려한 冷凍機의 엑세르기 概念의 要點과 증기압축식 냉동기의 각 과정의 엑세르기흐름에 대한 개념을 기술한 것이다.

前述한 冷凍사이클은 가장 단순한 것으로서 실제로는 각종의 壓縮機, 熱交換器, 吸收式冷凍機 등의 各過程에도 適用되어야 하며 또한 熱輻射 등도 檢討되어야 할 것이다. 이 概念을 적용하여 裝置 각 부의 非可逆性에 대한 檢討를 하고, 冷凍機器의 性能向上을 爲한 改良 등이 이루어져야 할 것이다. 또한 經濟性에 대한 檢討도 앞으로는 더욱 엑세르기概念에 主案點을 두어 研究檢討가 가해져야 할 것으로 생각된다.

參 考 文 獻

1) 信澤寅男：機械の研究 Vol. 27.No.12.P. 33
2) Z. Rant ; Forschung, 22-1 (1956), P. 36
3) K. Nesselmann, Kältetechnik, 8-3(1962).P.1
4) W. Tripp: ASHRAE(1966-1).P. 49. 68
5) 花岡裕：空氣調和, 衛生工學, 第45卷 第4號 PP. 22-27