熱에너지의 有効性

Availability of Thermal Energy

金 熙 喆*
Hi Chul Kim

1. 序 言

人類에 必須不可缺한 에너지는, 石油 · 石炭과 같은 化石燃料에 의한 熱에너지와 水力, 潮力, 波力, 風力等의 非熱에너지가 있으나, 에너지利用量中에 熱에너지가 絶對的 優位를 占하고 있다. 熱에너지에는 前記한 化石燃料 뿐만 아니라, 太陽집, 太陽熱發電所와 같은 太陽熱에너지의 直接利用, 核에너지의 熱에너지轉換, 地熱, 海水의 溫度差利用等, 熱에너지는 多様하면서 莫大한 에너지量을 保有하고 있는 實情이지만, 主로 石油資源에 依存하여 온 것이 現狀이다. 그러나, 1970年代 初期에 엄습한 石油波動以来, 世界的으로 에너지危機感에 사로잡혀, 世界各國은 脫石油化에 따른 에너지의 多様化와 에너지節約이 強調되게 되었다.

燃料節約에 관하여 말하면, 에너지利用의 効率化를 積極的으로 圖謀함에 있어서 熱에너지利用에 관한 評價方法에 새로운 檢討가 加해져서, 더 合理的인 評價方法의 確立이 必要하게 되었다. 이를 위해서는 從來의 熱力學 第一法則에 의한 熱에너지의 量的評價 뿐만 아니라, 熱力學 第二法則에 의한 質的評價의 重要性이 認識되어, 有効에너지(available energy)[1,2] 또는 엑세르기(Exergie)[3]의 概念이 浮上되고 있다. 勿論 이 概念을 適用하여 熱力學 第二法則에 의한 解析에 따른 熱精算(heat balance)에 있어서 全혀 새로운 結果가 얻어지는 것은 아니지만, 지금까지는 熱精算에 있어서 熱力學 第一法則에 의한 評價方法만이 強調되어, 熱力學 第二法則에 의한 評價方法은 거의 度外視되어온 것이 實情이며, 우리나라에서 發刊되는 熱力學에 관한 圖書에서도 이에 관한 陳述內容이 거의 찾아볼 수 없거나, 假令 言及된 것이 있다 하더라도 그 內容이 簡略하여 그 重要性이 輕視되어온 것이 事實이다.

그러나 熱力學 第二法則에 의한 에너지精算에 의하여, 第一法則에 의한 것 보다 熱에너지의 合理的이고 또한 有効한 科學的評價가 可能하게 되어, 裝置나 機器의 改善에 具體的이면서 合理的인 指針이 주어지게 된다. 그리하여 이들 概念과 方法의 紹介가 必要하다고 생각되어, 지금부터 우리들이 잘 아는 用語를 사용하여 解說을 試圖하기로 한다.

2. 에너지의 質的評價

모든 에너지源은 高位의 에너지와 低位의 에너지라고 부르는 두 가지 形態中의 어느 하나에 屬하게 된다.[4] 高位의 에너지라 함은 理論的으로는 損失없이 機械的 일로 轉換될 수 있는 에너지이며, 이에는 機械的 일, 電氣에너지, 水力, 潮力, 風力, 蓄力等이 있다. 한편

* 仁荷大學校 工科大學

低位의 에너지라 함은 그 一部만이 機械的 일로 轉換될 수 있는 에너지를 말하며, 化石燃料, 核分裂, 核融合, 地熱, 海水溫度差 等으로부터 誘導되는 모든 熱에너지가 이 것이다. 즉, 熱에너지는 熱力學 第二法則에 의하여 高位의 에너지, 다시 말하여 完全히 機械的 일로 轉換시킬 수 있는 有効에너지가 될 수는 없고, 一部는 無効에너지(unavailable energy, Anergie)로 轉落할 수 밖에 없다. 더 나아가서 熱에너지의 機械的 일로의 轉換程度도 熱에너지가 處해 있는 狀態에 따라 相異하며,어떤 一定量의 熱에너지라 해도,質的內容 즉 有効性(availability)을 確定할 수는 없고,狀態에 따라 千差萬別이 된다. 有効에너지와 無効에너지의 定義와 考察에 있어, 다음의 두 보기에 관하여 생각하기로 한다.

(i) $Q_1 = 100$kcal 의 熱量을 주는 溫度 $T_1 = 600$K의 高熱源이 있다고 하고, 周圍의 大氣溫度 $T_0 = 300$ K 인 경우, 이것을 低熱源(沈滯物 sink body이라고도 함)으로 하여, 이 高低熱源 사이에서 作動하는 熱機關에 의하여 高熱源으로부터 주어지는 熱 100 kcal中 얼마만큼이 일로 轉換될 수 있는 가를 보자. 이 경우에 얻어지는 最大일(maximum work)은 兩熱源 사이에 Carnot機關과 같은 可逆機關을 作動시킴으로써 얻어질 수 있음은 周知의 事實이다. 이 機關의 熱効率은 $\eta = (T_1 - T_0)/T_1 =$ 50 %로서, 高熱源에 의하여 주어진 熱量 $Q_1 = 100$ k cal 가운데, $W = 50$ k cal가 일로 轉換되고, 나머지 熱量 $Q_2 = 50$ k cal 는 空虛하게 大氣로 버려진다.

(ii) 다음에 $Q_1 = 100$ k cal의 熱量이 溫度 $T_1 = 600$K의 高熱源으로부터 溫度 $T_1' = 500$K인 熱源으로 一旦 移動된다고 하자. 이 熱移動이 이루어진 後, 이 熱源과 먼저와 同一한 溫度 $T_0 = 300$ K인 低熱源 사이에서 얼마나 일로 轉換될 수 있을까. 이 경우에는 $T_1' = 500$K 의 熱源에 貯藏된 熱量 $Q_1 = 100$ kcal은 T_1'의 溫度에서 Carnot機關과 같은 可逆熱機關에 供給되는 셈이 되어, 이 機關의 熱効率은 $\eta = (T_1' - T_0)/T_1' = 40$ %가 되며, 同一한 熱量 $Q_1 = 100$ k cal 이지만, 最大일 $W = 40$ k cal의 일 밖에 얻어지지 않고, $Q_2 = 60$ kcal의 熱量이 大氣로 버려진다. 이와 같이 同一한 熱量이라 하더라도, 이것이 供給되는 熱源의 溫度에 따라 利用率이 달라진다.

3. 有效性과 最大일

일은 恒常 完全히 熱로 變換될 수 있지만,熱은 熱力學 第二法則으로부터 일로 變換될 수 있는 範圍가 制限된다. 이 事實로부터 前述한 바와 같이 일이 熱보다 價値가 큰, 즉 質이 좋은 에너지形態임을 알 수 있다. 工學이나 技術의 立場에서 말하면, 熱機關이나 熱原動所와 같이 일出力을 될 수 있는데로 增加시키고, 冷凍機나 壓縮機와 같이 電動機와 같은 다른 系로부터 받는 일入力은 可能한 限 減少시키고자 하는 것이 關心事가 된다. 즉, 重要한 問題는 系가 하나의 狀態로부터 다른 狀態로 移動하는 경우에 얻어질 수 있는 最大일이 무엇인가에 관하여 생각하여 보기로 한다.

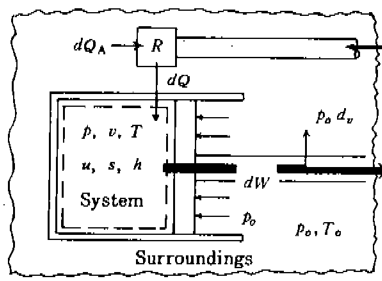

그림 1. 有效性 ─ 非流動系 [5]

지금 周圍(壓力 P_0, 溫度 T_0)로 둘러싸인 系(p, v, T等)를 나타내는 그림 1의 密閉系 (非流動系라고도 함)를 생각하자. 系의 狀態가 周圍狀態 즉 死狀態(dead state)까지 非流動過程에 의하여 可逆變化할 때 最大일이 周圍가 아닌 다른 系에 주어질 수 있다. 周圍와 系 사이에는 一般的으로 溫度差가 있기 때문에, 熱移動이 周圍와 系 사이에서 直接 일어나면 過程은 外部的으로 非可逆이 될 수 밖에 없다. 最大일의 必須條件은 可逆性의 確保이므로,이

熱交換이 可逆的으로 이루어지도록 하는 唯一한 方法은 可逆機關(그림 1의 R)을 經由하는 길이다. 이 可逆機關은 系가 하나의 行程을 完了하는 동안 無限數의 사이클을 營爲한다고 생각하자. 그러면 各微小사이클마다 一定溫度下에서 各 dQ의 微小熱이 傳達된다. 이 可逆機關을 돌리기 위하여 必要한 일量은 그림 1을 參照하여,

$$dQ - dQ_A = dQ - \frac{T_o}{T} dQ = dQ - T_o ds \quad \cdots (1)$$

式中 $dQ_A / dQ = T_0 / T$로부터 $dQ_A = (T_0/T) \cdot dQ$, 그리고 完義 $ds = dQ/T$가 使用되었다 (T는 可逆機關 R의 어떤 特定사이클期間中의 系의 溫度이다).

系는 總體일 dW를 發揮하는데, 周圍가 壓力 P_0에 있기 때문에 이 總體일 가운데 一部는 피스턴을 壓力 P_0에 이겨서 바른 쪽으로 移動시키는데 $P_0\, dv$ (dv는 일 dW가 이루어지는 동안 系의 體積變化量이다)만큼 消費된다. 또한 系의 全體일은 可逆機關 R을 돌리는데 必要한 일 만큼 減少되어야 한다. 그러므로 非流動過程에 의하여 周圍에 주는 일을 빼고 他系에 줄 수 있는 最大일 즉, 有効에너지(availablity) a는

(單位質量의 系인 경우 a記號를 쓸 수 있음)

$$a = \int \left\{ dW - (dQ - T_o ds) - p_o dv \right\}$$

$$= -\int (dQ - dW - T_o ds + p_o dv) \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

式中의 a는 참일이 發生되고, 積分範圍가 주어진 狀態로부터 死狀態까지의 경우 正의 값이 된다.

非流動系의 에너지方程式은

$dQ = du + dW$, 또는 $dQ - dW = du$

이것을 式 (2)에 代入하면

$$a = -\int (du + p_o dv - T_o ds)$$

$$= (u - u_o) + p_o (v - v_o) - T_o (s - s_o)$$

式中 周圍狀態 P_0, T_0은 一定한 것으로 잡고, P_0, T_0, v_0는 系가 死狀態에 到達한 後의 系의 性質이다. 이 a는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$a = (u + p_o v - T_o s) - (u_o + p_o v_o - T_o s) \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

이 式(3)은 非流動系(密閉系)가 周圍하고만 熱交換하면서 狀態 P, T로부터 死狀態 P_0, T_0까지 非流動過程中 이루어질 수 있는 最大일이 된다. $(u + P_0\, v - T_0 s)$項은 密閉系에 대한 有効에너지函數(availability function)[2] 라 하며, 普通 ϕ로 表記한다. ϕ는 點函數(u, v, s)와 常數(p_0, T_0)로 成立되므로, 系의 狀態만에 依存하는 點函數이다. 그러므로 狀態 1과 2 사이의 過程에서 언어지는 最大일은 有効에너지函數의 差와 같다. 즉,

$$a_{max} = -\triangle a = \phi_1 - \phi_2 \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

지금까지 密閉系(非流動系)를 取扱하였는데, 다음으로 開放系(流動系라고도 함)에 대하여 考察하기로 한다. 定常流動系의 有効性 즉 最大일은 流動系가 周圍하고만 熱交換하면서 死狀態까지 可逆變化할 때, 주어진 狀態下의 流動系로부터 얻어질 수 있다. 그림 2를 參照하여 微分形의 有効에너지는,

$$da = dW - (dQ - T_o ds)$$
$$= (dQ - dW - T_o ds) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

定常流動過程의 에너지方程式은 一般으로

$$dQ - dW = dh + dK + dP$$

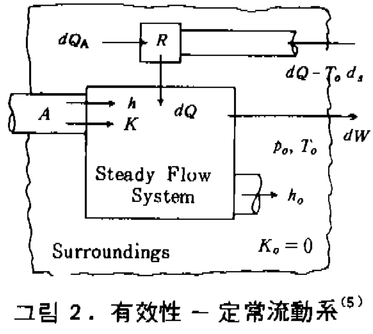

그림 2. 有效性 — 定常流動系[5]

式中 h, K, P는 各各 系의 엔탈피, 運動에너지, 位置에너지를 뜻한다. 普通 dK, dP는 零으로 잡을 수 있는 경우가 많으므로 省略하고, $dQ-dW$의 값을 式(5)에 代入하여,

$$a=-\int(dh-T_o ds)$$
$$=(h-h_o)-T_o(s-s_o)$$

이 積分은 주어진 狀態로부터 死狀態까지 이루어진다. 윗 式은 먼저와 같이,

$$a=(h-T_o s)-(h_o-T_o s_o)$$

$(h-T_0 s)$는 狀態 h, s만이 依存하는 點函數이며, 이것을 開放系의 有效에너지函數[2] 또는 最初로 提唱한 Darrieus의 이름을 따서 Darrieus 函數[6]라 하며 普通 b로 表記한다. 그러므로 有效에너지 a는 $a=b-b_0$으로 表現된다. 여기서 b_0은 $b_0=h_0-T_o s_o$을 意味한다.

狀態 1과 2 사이의 流動過程中의 最大일 a_{max}는

$$a_{max}=-\triangle a=b_1-b_2 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

여기서 注意할 것은, 系의 純粹한 狀態量인 Helmholtz 函數 $f=u-Ts$ 및 Gibbs 函數 $g=u-Ts+pv=h-Ts$와는 달리, 有效에너지函數 ϕ 및 b는 系만의 狀態가 아닌 周圍의 壓力과 溫度에도 依存하는 量이다. 따라서 에너지의 價値가 相對的인 것임을 意味하며, 有效에너지는 死狀態를 基準으로 하여 잡은 에너지의 일 能力을 나타내고 있다. 이것은 일이 最高의 質의 에너지形態이기 때문이다. 그리고 死狀態는 固定된 것이 아니고, 狀況에 따라 相異하는 값을 잡을 수 있음을 指摘하여 둔다.

여기서 한 가지 더 指摘하고자 하는 것은, 系以外의 모든 것을 包含시켜 周圍라는 말을 使用하여 왔는데, 거의 모든 熱力學系에 있어서 周圍는 均一壓力 p_0 및 均一溫度 T_0의 大氣가 된다. 이 大氣는 任意의 系에 比하여 대단히 크고, 그 壓力과 溫度는 系의 任意의 過程에 의하여 變化되지 아니하되, 大氣는 系의 擧動에 制限과 影響을 加한다는 事實이다. 따라서 實際 問題로서 重要한 것은 大氣하고만 熱交換하는 系에 있어서 最初狀態가 주어질 때, 最大일을 얻을 수 있는 最終狀態는 大氣와 平衡狀態가 되는 즉 死狀態로 되는 것이다.

狀態變化에 의하여 얻어지는 일은 可逆過程의 경우 最大이며, 이것이 最大일 즉 有效에너지가 된다. 可逆過程은 이것이 일어난 後에, 系와 모든 周圍가 모두 最初狀態로 復歸할 수 있는 過程이다. 實際의 過程은 非可逆過程이기 때문에 原狀態로 되돌아갈 수 없는 結果가 생긴다. 系와 周圍와의 全에너지는 熱力學 第一法則에 의하여 一定으로 維持되지만, 非可逆過程의 結果는 일로 轉換될 수 있는 에너지의 減少를 招来한다. 따라서 어떤 過程中에 에너지는 保存되지만, 有效에너지는 消費되어 無效에너지로 된다. 즉, 熱力學 第一法則으로부터 有效에너지와 無效에너지의 合은 一定하지만, 第二法則으로부터 有效에너지의 減少量만큼 無效에너지의 增加量이 된다. 이 無效에너지의 增加가 現象의 非可逆性에 緣由하는 것으로서, 이것을 非可逆損失이라 부른다.

여기서 몇 가지의 非可逆損失을 들기로 한다.

첫째로, 完全氣體로 생각한 氣體의 混合에서 일어나는 非可逆損失 I_r은,

$$I_r=T_0\sum_i m_i R_i Ln(p/p_i) \cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

式中, m_i : 成分가스의 質量
R_i : 成分가스의 氣體常數
p : 混合氣體의 全壓
p_i : 成分가스의 分壓
T_0 : 周圍溫度

다음에 氣體의 絞縮에 따른 非可逆損失 I_r은,

$$I_r=T_0\, mR\, ln(p_1/p_2) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

式中, m : 가스流量
R : 氣體常數
p_1 : 絞縮前의 壓力
p_2 : 絞縮後의 壓力

세번째로, 高低溫側의 流體溫度를 各各 T_h,

T_l로 할 때, 熱交換에서 일어나는 非可逆損失 I_r은,

$$I_r = T_0 \int \left(\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_h}\right) dQ \quad \cdots\cdots(9)$$

네번째로, 斷熱過程中의 非可逆損失 I_r은 狀態變化에 의한 엔트로피增加量을 $\triangle S$로 하면,

$$I_r = T_0 \triangle S \quad \cdots\cdots(10)$$

4. 有 效 率

에너지利用의 程度를 나타내는 尺度로서 從來 다음에 例示하는 것과 같은 것이 使用되고 있다. (1)보일러를 包含한 暖爐의 熱效率 65%, (2)空氣調和裝置의 成績係數(動作係數라고도 한다, Coefficienct of Performance, CP 또는 COP로 表記한다) 2.5, (3)內燃機關의 熱效率 25%, (4)電動機의 效率 90%.

이들 네 가지 보기에 관하여 생각하여 보면 (1)은 家屋內로 有效하게 傳達된 熱과 燃料의 燃燒熱의 比가 65%임을 意味하고 있으며, 100%의 暖爐가 完全하다는 것을 暗示하고 있다. (2)는 除去된 熱과 電氣入力과의 比가 2.5임을 뜻하고 있는데, 이 數値를 評價하기 위해서는 이것을 最大可能한 成績係數와 比較할 必要가 있다. (3)은 內燃機關의 軸出力과 燃料燃燒熱入力과의 比가 0.25임을 뜻하고 있는데, 이 效率은 周知하는 바와 같이 熱力學 第二法則에 의하여 制限되어, 1보다 작은 理論的 上限을 가지고 있다. (4)는 機械的出力과 電氣入力과의 比가 0.9임을 意味하고 있으며, 그의 理想最大效率은 1이 된다.

이들의 보기에 適用된 에너지利用評價의 表示法은 基本的으로 同一하며, 共通的으로 다음과 같이 效率 η로 定義된다.

$$\text{效率 } \eta = \frac{\text{系에 의하여 遂行된 所望 種類의 에너지 傳達量}}{\text{系로의 에너지入力}} \quad \cdots(11)$$

η의 理論的 最高値가 1보다 큰 경우는 이것을 普通 成績係數 CP 또는 COP라고 하고, 1보다 작거나 같은 때에는 이것을 通常 效率 η라고 부르고 있다.

式 (11)의 效率은 熱力學 第一法則에 基礎를 둔 것으로서, 第一法則效率이라고도 불리는데, 다음과 같은 短點을 가지고 있다. 즉, 첫째로 그 最大値는 系 및 溫度에 따라 1보다 클 수도 작을 수도, 또한 같을 수도 있으며, 다음으로 에너지利用의 可能性을 나타내는 效率을 支配하는 熱力學 第二法則의 役割이 適切하게 加해져 있지 않아서, 에너지의 合理的, 現實的 利用可能性의 評價가 不充分하며, 끝으로 所望되는 系가 일과 熱의 組合인 複合系에 대해서는 一般化하는 것이 困難하다.

이 效率에 의해서는 現象의 非可逆性에 의한 損失의 程度를 合理的으로 評價할 수 없음을 旣述하였는 바, 非可逆性을 評價하는 效率의 一例로 우리들이 잘 아는 터어빈의 膨脹時의 斷熱效率 $\eta_t = \triangle h / \triangle hs$를 생각해 보기로 한다. 여기 $\triangle h$및 $\triangle hs$는 斷熱膨脹時의 實際的 및 可逆的 熱落差인데, 이 斷熱效率은 效率의 一般的 定義에 따른 것이다. 이에 反하여 有効率(effectiveness)은 터어빈의 斷熱膨脹時의 實際 熱落差 $\triangle h$와 有效에너지의 減少量 $\triangle b$와 比率 $\varepsilon = \triangle h / \triangle b$로 定義하고 있다. 斷熱效率 η_t와 有效率 ε은 그림3을 參照하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta_t = \frac{\triangle h_s}{\triangle h_s} = \frac{\triangle h}{\triangle h + \int_{2s}^{2} T \cdot d_s} \quad \cdots\cdots (12)$$

$$\varepsilon = \frac{\triangle h}{\triangle b} = \frac{\triangle h}{\triangle h + T_0 \triangle s} \quad \cdots\cdots (13)$$

그림3으로부터 알 수 있는 바와 같이, ε는 無效에너지의 增加만이 計算에 들어 있는데 反하여, η_t는 點(2s)에 대한 點(2)의 流體의 無效에너지와 有效에너지의 增加가 모두 計算에 넣어져 있다. 이 有效率을 더 나아가 動力사이클까지 擴張하여, 熱力學 第一法則에 基準한 熱效率 $\eta = W_{out}/Q_{in}$ (W_{out} : 出力, Q_{in} : 入熱)와는 달리, 다음과 같이 定義한다.

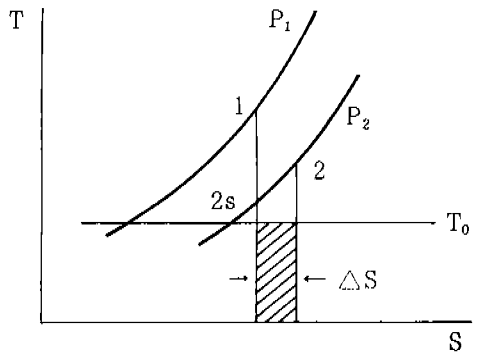

그림 3 . 터어빈의 膨脹

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{W_{out}}{\triangle\phi} \\ \text{또는,}\quad \varepsilon &= \frac{W_{out}}{\triangle b} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (14)$$

여기서, $\triangle\phi$ 및 $\triangle b$는 密開사이클 및 開效사이클에서 有效에너지의 減少量이고, W_{out}는 사이클에서 얻어진 일量이다.

이 有效率을 一般化하여 그 出力이 熱 또는 일의 有效한 傳達役割을 하는 裝置나 系에 대하여 다음과 같이 定義한다.

$$\text{有效率}\ \varepsilon = \frac{\text{實際로 有効하게 傳達된 熱 또는 일}}{\text{有效하게 傳達될 수 있는 最大可能한 熱 또는 일}}$$

이 定義로부터 明白한 바와 같이, 有効率은 實際로 有効하게 傳達된 熱 또는 일을 最大可能한 理想有効傳達熱 또는 일로 나눈값이므로, ε은 恒常 1보다 작고 그 最大値는 어떤 경우에나 1이 된다. 따라서 有効率은 理想的인 것에 相對的인 任意의 裝置나 系가 가지는 性能의 質에 관하여 直接的인 洞察을 주며, 原理的으로 이 裝置나 系에 얼마만큼의 改善의 餘地가 있는 가를 알려 주고, 더 나아가서 燃料의 浪費의 尺度도 될 수 있다. 有効率은 熱力學 第二法則에 基礎를 두고 있기 때문에 第二法則効率이라고도 한다.

各種裝置의 效率 η와 有效率 ε의 式과 數値例를 들기로 한다.

1) 가스터어빈

$$\eta = \triangle h / \triangle h_s$$
$$\varepsilon = \triangle h / \triangle b = \triangle h / (\triangle h + T_0 \triangle s)$$

式中 $\triangle h_s$: 터어빈의 可逆熱落差
$\triangle h$: 터어빈의 實際非可逆熱落差
$\triangle b$: 터어빈의 有效에너지 變化量
$\triangle s$: 터어빈의 엔트로피 增加量
T_0 : 周圍油度

數値例로서 가스를 空氣로 잡고, 터어빈入口溫度 650 ℃, 膨脹壓力比 4, 周圍溫度 288K일 때 斷熱效率 $\eta = 80\%$이면, 氣體表[7]를 利用하여 $\triangle h_s = 71.9$ kcal/kg, $\triangle h = 57.5$ kcal/kg, $\triangle s = \phi_2 - \phi_{2s} = 0.809 - 0.777 = 0.022$ kcal/kg K (이 ϕ_2 및 ϕ_{2s}는 有效에너지 函數가 아니고, 空氣表中의 엔트로피函數임)이며, $\eta = 0.8$에 比하여, $\varepsilon = 57.5 / (57.5 + 288 \times 0.022) = 0.9$가 된다.

2) 壓縮機

$$\eta = \triangle h_s / \triangle h$$
$$\varepsilon = \triangle b / \triangle h = (\triangle h - T_0 \triangle s) / \triangle h$$

數値例로서, 壓縮機入口溫度 288K(周圍溫度와 同一하게 함), 壓力比 4, 斷熱效率 $\eta = 0.7$로 할 때, 氣體表[7]를 利用하여 $\triangle h_s = 33.5$ kcal/kg, $\triangle h = 48.0$ kcal/kg, $\triangle s = 0.032$ kcal/kg K이며, $\eta = 0.7$에 대하여 $\varepsilon = 0.81$이 된다.

3) 冷凍機 (電氣驅動式)

成績係數 $CP = Q_1 / W_{in}\ (= \eta)$

有效率 $\varepsilon = CP\{T_0 / T_1) - 1\}$

式中 Q_1 : 蒸發溫度 T_1의 熱源으로부터 除去되는 熱量
W_{in} : 電動機에 의한 入力
T_0 : 周圍溫度

數値例로서 암모니어를 冷媒로 하고, $T_1 = -30$ ℃, $T_2 = 30$ ℃ (凝縮溫度), $T_0 = 16$℃인 경우 암모니어 $p-h$ 線圖를 利用하여,

$\eta = 3.13$
$\varepsilon = 0.56$

을 얻는다.

4) 熱펌프(電動機驅動式)

$$CP(=\eta) = Q_2/W_{in}$$
$$\varepsilon = CP\{1-(T_0/T_2)\}$$

式中 Q_2: 凝縮溫度 T_2에서 放出되는 熱量
T_0: 周圍溫度
W_{in}: 電動機에 의한 入力

數值例로서는 먼저의 3) 冷凍機의 數值例를 適用하는 경우

$CP = 4.1$
$\varepsilon = 0.2$

이 된다.

以上의 몇 가지 數值例로부터 알 수 있는 바와 같이 η와 ε는 條件에 따라 두 값의 差異가 極端으로 커지기도 작아지기도 하고 또한, 前述한 바와 같이 效率 η는 1보다 작기도 하고 크기도 하지만, 有效率 ε는 恒常 1보다 작은 값을 가진다.

5. 有效에너지 精算

지금까지 說明한 바와 같이 熱力學 第一法則은 量的 見地에서 熱精算(heat balance) 또는 에너지精算의 基礎를 提供함에 反하여, 熱力學 第二法則은 有效에너지精算(availability balance, available energy balance)을 可能하게 하여, 質的인 面에서 第一法則으로는 얻어질 수 없는 情報를 提供한다. 그리하여 얻어진 일과 有效에너지變化를 比較함으로써 各各의 過程을 理想에 接近시킬 수 있는 程度의 尺度를 把握하여, 이에 依하여 性能改善을 위한 努力이 어디에 加해져야 하는지를 알 수 있다.

여기서 理解를 돕기 위하여 가스터어빈 裝置의 基本사이클인 Brayton 사이클에 관한 에너지精算 및 有效에너지精算의 一例를 表1에 表示한다. 이 사이클에서 주어진 條件은, 初壓 및 初溫이 各各 1 atm, 15 ℃, 壓力比는 4, 터어빈入口溫度는 650 ℃로 하고, 壓縮機의 斷熱效率 η_c와 터어빈의 斷熱效率 η_T가 (i) $\eta_c = \eta_T = 100\,\%$인 경우와, (ii) $\eta_c = \eta_T = 80\,\%$인 두가지 경우를 잡았으며, 周圍溫度 T_0은 初溫인 15 ℃와 같다고 하고, 計算은 氣體表[7]를 利用하였다.

表 1. Brayton 사이클의 에너지 및 有效에너지 精算

(i) $\eta_c = \eta_T = 100\,\%$인 경우

		에너지精算		有效에너지精算	
		kcal/kg	%	kcal/kg	%
入力	燃燒器	124.75	78	69.19	67
	壓縮機	33.40	22	33.40	33
	計	158.15	100	102.59	100
出力	排熱	85.36	54	29.80	29
	터어빈	72.79	46	72.79	71
	計	158.15	100	102.59	100

(ii) $\eta_c = \eta_T = 80\,\%$인 경우

		에너지精算		有效에너지精算	
		kcal/kg	%	kcal/kg	%
入力	燃燒器	111.41	73	60.91	63
	壓縮機	41.24	27	36.30	37
	計	152.65	100	97.21	100
出力	排熱	94.83	62	33.13	34
	터어빈	57.82	38	64.08	66
	計	152.65	100	97.21	100

(i) $\eta_c = \eta_T = 100\,\%$인 경우

表1을 引用하여 다음의 값들을 얻는다. 즉,

$$W_{out} = 72.79 - 33.40 = 39.39 \text{ kcal/kg}$$
$$Q_{in} = 124.75 \text{ kcal/kg}$$
$$\triangle b = 69.19 \text{ kcal/kg}$$

$$\eta = W_{out}/Q_{in} = 31.6\,\%$$
$$\varepsilon = W_{out}/\triangle b = 56.9\,\%$$

이 η와 ε을 比較하여 보면, 에너지 精算에서 $\eta \fallingdotseq 32\,\%$이므로 아직도 여러가지 改善을 加

하면 約 3倍의 일을 얻을 수 있는 可能性이 있는 것 같지만, 有效에너지精算에서는 주어진 有效에너지의 60% 가까이가 이미 이 사이클에서 일로 轉換되었기 때문에, 아무리 改善을 하여도 約 40% 밖에 일로 더 轉換할 수 없음을 안다. 또한 排熱은 에너지精算에서 熱入力의 68.4%로 大端히 큰 것으로 생각되나, 有效에너지 精算으로 解析하면 有效에너지入力의 約 43%에 지나지 않는데, 이것은 排氣가 比較的 低溫에서 이루어지기 때문에 有效에너지로서의 損失은 작아짐에 起因한다.

(ii) $\eta_c = \eta_T = 80\%$인 경우

表 1 로부터

$$W_{out} = 57.82 - 41.24 = 16.58 \text{ kcal/kg}$$
$$Q_{in} = 111.41 \text{ kcal/kg}$$
$$\triangle b = 60.91 \text{ kcal/kg}$$
$$\eta = W_{out}/Q_{in} = 14.9\%$$
$$\varepsilon = W_{out}/\triangle b = 27.2\%$$
$$\varepsilon_c = 87.6\% \text{ (壓縮機의 有效率)}$$
$$\varepsilon_T = 90.2\% \text{ (터어빈의 有效率)}$$

이 경우에도 에너지精算과 有效에너지 精算을 比較하여 보면 (i)의 경우와 마찬가지로 $\eta = 14.9\%$에 比해, ε로서는 27.2%로 增加되어 有效에너지損失이 적음을 알 수 있다. 또한 壓縮機 및 터어빈의 斷熱效率이 80%이면, 아직 20%의 改善餘地가 있는 듯 하나, 有效率로 따지면 90% 內外가 되어, 實際로는 不過 10%의 改善餘裕 밖에 없음을 알 수 있다.

6. 結 言

有效에너지의 槪念을 使用한 解析은 特히 새로운 것은 아니나, 從來 主로 使用되어 온 에너지精算으로 얻어지지 않는 情報가 주어지며, 따라서 에너지節約의 觀點에서 熱力學 第一法則과 第二法則의 雙方으로 檢討하여 改善의 指針을 찾아내야 할 것이다. 여기서 記述한 方法은 裝置나 系에 局限할 것 없이 國家的 스케일의 에너지利用의 問題에도 原理的으로 適用할 수 있는 것이며, 有效에너지의 槪念을 適切히 應用하여, 에너지利用의 適正한 評價가 이루어져야 할 것이다. 아울러 熱力學에 관한 圖書內容에 有效에너지의 槪念과 解析方法이 더 많이 收容되는 것이 바람직하다고 생각된다.

文 獻

1) Keenan, J.H., "Thermodynamics" (1941), John Wiley & Sons.
2) Lee, J.F. & Sears, F.W., "Thermodynamics" (1956), Addison-Wesley.
3) Rant, L., Forschung, 22-1 (1956), 36.
4) Bruges, E.A., "Available energy and the second law analysis" (1959), Butterworths Scientific Pub.
5) Fairs, V.M., "Thermodynamics" (1959), p.122-123, Macmillan Co.
6) Darrieus, G., "Engineering," 120-3373 (1930), 383.
7) Keenan, J.H. & Kaye, J., "Gas Table" (1956), John Wiley & Sons.