

에너지 有効利用에 대한 熱力學的 考察

張炳周

機械工學科

(1982. 10. 30 접수)

〈要約〉

熱力學 第一法則은 熱의 收支를 精算하므로 熱管理의 方向을 提示하고 熱力學 第二法則은 에너지의 質的인 解析으로 有効利用의 필요성을 提示하고 있다. 에너지 有効利用은 에너지 入力量을 적극적으로 減少시키며 또한 에너지 劣化를 抑制하는데 있음을 밝혔다.

Process system에서 有効에너지와 그 損失은 結果의 結果로 熱, 壓力 및 化學反應에 關係 個別的으로 定量的으로 구할 수 있고 그 사이에 加減性이 成立되기 때문에 有効에너지와 그 損失을 하나 하나 最小化하여 가면 結局은 全體의 損失이 最小化되고 에너지의 有効利用에 도달 할 수 있다.

A Note on the Optimal Use of Energy

Chang Byung Ju

Dept. of Mechanical Engineering

(Received October 30, 1982)

〈Abstract〉

The first law of thermodynamics gives a method to calculate heat-balance and, hence, to optimize heat-management. The analysis of the second law of thermodynamics gives the method how to classify energy according the quality and shows the necessity of the optimal use of energy. It is concluded that the reduction of energy input and the prevention of energy degradation is necessary for the optimal use of energy.

In the process system, available energy and its losses can be calculated at each chemical reaction, temperature and pressure change and hence, the optimal use of energy can be achieved if available energy and its losses at every process are minimized.

I. 序 論

人類의 生活은 에너지의 消費없이는 단 하루도 維持되지 않는다. 産業革命以後 매장 에너지 資源에 대한 依存度는 急增의 연속이다. 한편 增殖爐나 核融合爐가 實用化되지 않는 현재로서는 核燃料를 包含시키더라도 利用可能한 매장 에너지 資源에는 명확한 限界가 있다.

어떤 推測⁽¹⁾에 依하면 人類가 과거 2000年間에 사용한 에너지 總量은 約 18Q*로 그 반이상은 最近의 100年間에 사용된 것이다. 특히 産業革命以後의 伸長은 엄청나게 커져 1850년에는 0.01Q/year 이던 것이 1970년에는 0.17Q/year 로 거의 10배에 이르고 있는 實情이다. 이런 推算으로 産業이 發展되고 人口가 늘어날수록 今後 100年間에는 100~500Q가 필요하게 된다. 化學燃料의 경우 추정매장량은 全 매장량이 450Q인데 經濟的 發掘可能量은 에너지로

* 1Q=10⁸ BTU=2.52×10¹⁷ kcal=2.93×10¹⁴ KWh. 1Q는 7,000kcal/kg의 石炭 3.6×10⁶ton에 해당하는 에너지.

換算하여 最大 100Q로 내다보며 0.17Q/year으로 는 約 600年, 伸長率을 감안하면 50~150年이라는 壽命이다. (2)

따라서 經濟의 zero 成長을 願치 않는다면 에너지 消費의 擴大는 어쩔수 없는 人類의 運命이다.

이렇듯 使用하기 쉬운 石油가 數 10年이라는 短時日內에 바닥이 난다면 그 代替에너지로는 高價인 化石燃料나 安全性을 높인 原子力利用, 低密度의 太陽熱 또는 熱自體를 直接的으로 利用하는 方法을 研究하지 않을 수 없다.

生産活動을 영위하기 위해 에너지資源의 有効利用度를 높이는 것도 바람직하나 그 可能性이란 그렇게 쉽지 않는 것으로 判斷되어 여기서는 主로 일과 관련시켜 에너지의 利用을 熱力學的으로 論하고자 한다.

II. 에너지의 存在形態

에너지源으로서의 바람직한 條件에는 첫째 經濟性이 있고, 둘째 需要에 對應한 安定性이 있고, 셋째 環境과 害가 없는 安定性, 넷째 地域的으로 偏在하지 않는 普遍性, 다섯째 移動性을 고려해야 하는데 風力, 潮力, 水力, 地熱, 太陽光線 등은 安全性과 普遍性은 우수하나 安定性, 移動性에 難點이 있고, 化石燃料과 動植物燃料은 安定性, 移動性은 우수하

나 安全性과 普遍性에 문제가 있다. 原子燃料은 安定性과 移動性은 좋으나 우라늄, 토륨은 安全性 普遍性에 문제가 있다. 萬一 重水素, 三重水素의 核融合利用이 실현되면 經濟性, 安定性, 普遍性, 移動性이 理想的인 일 것이다.

그런데 에너지는 表 1과 같이 몇개의 形態로 分類화시킬 수 있다.

物體가 가진 全에너지는 일반적으로

$$E = KE + PE + U \quad (1)$$

로 表示한다. KE는 巨視的運動에너지, PE는 巨視的 場에너지, U는 微視的인 에너지로 粒子의 無秩序운동이나 粒子間相互作用에 起因하는 内部에너지로 대개의 경우 이 内部에너지가 數의 形態로 外部에 放出된다. 또 熱力學 第一法則에 의해

$$dE = dQ - dW \quad (2)$$

로 表示되는데 어떻게 内部에너지를 일로 變換시킬이 대단히 重要하다.

III. 熱力學 第二法과 일

Joule은 物體의 落下에너지로 물의 溫度上昇을 測定하여 일과 熱의 關係를 구했고 이로 인해 에너지 保存法則인 熱力學 第一法則을 導出했다. 熱力學 第二法則은 일을 週期的으로 일기 위해서는 熱平衡이 아닌 二個의 熱源이 있어야 한다고 主張했

〈表 1〉 에너지의 存在形態

大 分 類	中 分 類	內 容	實 例
外 部 에 너 지	巨視的 運動에너지 巨視的 場에너지 重 力 場 電 磁 場	並進, 回轉	風力, 潮力 水力 雷
內 部 에 너 지	微視的 운동에너지 (熱에너지 포함) 微視的 場에너지 電荷를 포함하는 電磁場(化學에너지) 核力의 場에너지 粒子內 運動에너지 物質에너지	分子運動, 格子振動 原子結合, 原子間結合 分子間結合, 雙極子 Moment 核分裂, 核融合 軌道에너지, 스핀, 粒子, 反粒子 消滅	地 熱 化石燃料(石炭, 石油, 天然가스) 動植物인코, 食料 原子燃料 (U, Th, D, T)
輻 射 에 너 지		眞空間電磁場 (電磁波)	太陽光線

다. 高温熱源 T_H , 低温熱源 T_L 을 생각하여 그 사이에 作動流體가 高温熱源에서 熱量 Q_H 를 받아 低温熱源에 Q_L 을 주어 일 W 를 하는 사이클에 대해 第一法則에서 $W=Q_H-Q_L$ 이고 두개의 熱源을 包含하는 孤立系 全體의 entropy 變化를 생각하면 第二法則에서

$$-\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} > 0$$

즉,

$$W \leq Q_H \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) \quad (3)$$

가 된다. 식 (3)에서 等號가 成立되는 最大일을 얻기 위해서는 變化는 全部 可逆的이어야 한다. 즉 Carnot cycle 이 된다.

반대로 低温熱源에서 열을 받아 高温熱源에 열을 주기 위해서는 系에 일을 해야할 必要가 있다. 이 일 W 는

$$W \geq Q_L \left(\frac{T_H}{T_L} - 1\right) = Q_H \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) \quad (4)$$

를 滿足해야 한다. 즉 필요한 最小일은 變化가 可逆的인 경우고 그 크기는 식 (3)의 最大일과 같다. 일반적으로 變化는 可逆的이 아니기 때문에 일어나는 일은 $Q_H\{1 - (T_L/T_H)\}$ 보다 적고 熱源을 꺼꾸로 되돌리기 위한 必要일은 $Q_H\{1 - (T_L/T_H)\}$ 보다 크다.

다음 高低兩熱源의 熱容量을 各各 C_H, C_L 로 두면 最終溫度를 T_E 로 하여, 그 사이의 일 W 는

$$W = C_H(T_H - T_E) - (T_E - T_L) \quad (5)$$

이다. 또 두熱源과 作動流體사이의 熱交換은 溫度差없이 이루어진다고 보면 entropy 變化는 다음과 같다.

$$\int_{T_H}^{T_E} \frac{C_H dT}{T} + \int_{T_L}^{T_E} \frac{C_L dT}{T} \geq 0$$

즉,

$$T_E \geq T_H^{C_H/(C_H+C_L)} T_L^{C_L/(C_H+C_L)} \quad (6)$$

最大일은 T_E 가 最低일때 이므로

$$T_{Hmin} = T_H^{C_H/(C_H+C_L)} T_L^{C_L/(C_H+C_L)} \quad (7)$$

로 두어 식 (5)에서

$$W_{max} = C_H(T_H - T_{Hmin}) - C_L(T_{Hmin} - T_L) \quad (8)$$

로 주어진다.

$C_H = C_L$ 인 특별한 경우에는

$$T_{Hmin} = \sqrt{T_H \cdot T_L} \quad (9)$$

가 된다.

熱容量 C_H 의 高温熱源과 熱容量이 극히 큰 一定

溫度 T_L 의 低温熱源의 경우에 얻어지는 最大일은

$$W_{max} = C_H T_L \ln \frac{T_H}{T_L} + C_H(T_H - T_L) \quad (10)$$

가 된다.

初期狀態 P, V, T, U, H, S 인 密閉系가 狀態 P_0, T_0 의 外部中에 있고 外界와 平衡後의 系의 狀態는 P_0, V_0, T_0, U_0, S_0 라 하면

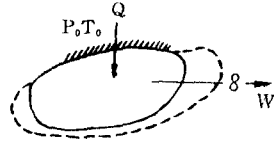


Fig.1 Closed System

Q 의 移動에 의한 外界의 엔트로피 減少量 = Q/T_0 ,

系의 엔트로피 增加量 = $S_0 - S$

따라서

$$Q/T_0 = S_0 - S$$

또 第一法則에서

$$U + Q = U_0 + (P_0 V_0 - P V) + W$$

위의 두 식에서 最大일은

$$W_{max} = U - U_0 - T_0(S - S_0) - (P - P_0)V \quad (11)$$

가 된다.

또 그림 2의 流効系에서 流入된 量만큼 流出하여 定常狀態를 유지한다고 보면 앞에서와 같이 可逆變化에서 엔트로피의 發生이 없다는 條件에서

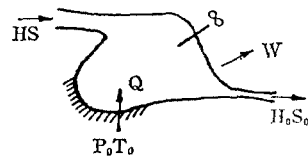


Fig.2 Flow System

$$Q/T_0 = S_0 - S$$

第一法則에서

$$H + Q - W = H_0$$

위의 두 식에서 最大일은 다음과 같다.

$$W_{max} = H - H_0 - T_0(S - S_0) \quad (12)$$

다음에 化學變化를 포함하여 Helmholtz의 自由 에너지를 導入한다.

$$F = U - TS$$

라 하면 一定量의 物質이 狀態 1에서 2로 等溫過程下에서 이루어지는 最大일은

$$W_{max} = F_1 - F_2 \quad (13)$$

로 주어진다.

계속 補給되는 流動系에 대해서는 Gibbs의 自由 에너지

$$G = H - TS$$

로 하여 等壓等溫過程에서 有効한 最大인은 膨脹, 收縮에 포함되는 일의 제의 하고

$$W_{\max} = G_1 - G_2 \quad (14)$$

로 주어진다.

Ⅱ. 有効에너지의 評價

溫度 T_0 (°K)의 熱量 Q 에 대한 有効에너지(3.11.3) E 는 환경온도가 T_0 (°K)이면 ($T > T_0$)

$$\dot{E} = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (15)$$

이고 無効에너지 A 는

$$A = \dot{Q} \cdot \frac{T_0}{T} \quad (16)$$

이다. 溫度가 $T < T_0$ 이면 有効에너지는

$$|\dot{E}| = \dot{Q} \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) \quad (17)$$

이 되며 T 와 T_0 의 高低에 관계없이 有効에너지는 환경온도로부터의 차이가 클수록 크다.

熱量 Q 가 일고한으로 溫度수준 T_1 에서 T_2 ($T_2 \leq T_1$)로 변화했다고 보면 entropy 변화는

$$\Delta S = Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

有効에너지 損失은

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_1 - E_2 = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) - Q \left(1 - \frac{T_0}{T_2} \right) \\ &= T_0 \cdot \Delta S \\ &= Q \cdot \frac{\Delta T}{T_1^2} \quad (\Delta T = T_1 - T_2) \end{aligned} \quad (18)$$

가 되는데 熱交換하는 兩物體 사이에 溫度差가 있으면 有効에너지는 減少된다.

한편 어떤 領域에 流入, 流出하는 여러 종류의 物質이 있는 경우에 대해 基準面에서 높이가 Z , 流速 v 인 運動에너지를 고나하여 數式化한다. 重量流量은 \dot{m} 로 外界에서 溫度기온 T_j 의 熱入力 \dot{Q}_j 가 있고 外界에 미치는 일 \dot{W}_k 가 있다면 그 領域에 대한 有効에너지의 減少率 $\Delta \dot{E}$ 는 다음식이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{E} &= \sum_i \dot{m}_i \left(H_{1i} - T_0 S_{1i} + A z_{1i} + A \frac{v_{1i}^2}{2g} \right) \\ &\quad - \sum_i \dot{m}_{2i} \left(H_{2i} - T_0 S_{2i} + A z_{2i} + A \frac{v_{2i}^2}{2g} \right) \end{aligned}$$

$$+ \sum_j \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) - \sum_k \dot{W}_k \quad (19)$$

여기서 A 는 일의 熱當量이며 W 와 Q 는 같은 단위로 간주한다.

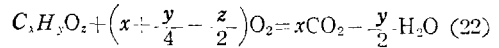
다음에는 化學反應의 하나인 燃燒에 대해서 생각한다. 燃料의 有効에너지는 可逆으로 酸化가 이루어 질때 일어나는 일과 生成物이 酸化後의 狀態에서 環境狀態까지의 分壓의 差에 기인하는 擴散效果까지 포함해서 일어나는 일의 합이다. 單位 mol에 대해 얻어지는 工業일을 $W_{i,rev}$ 라 하면

$$W_{i,rev} = H_i(T_0) - [S_{fuel} - (O_{2,min} SO_2(T_0, P_0))] \quad (20)$$

가 成立된다. 여기서 H 는 發熱量, i 成分의 mol數, $(O_{2,min})$ 는 必要한 酸素 mol數, s 는 mol當 entropy이다. 따라서 有効에너지 e_{fuel} 은

$$\begin{aligned} e_{fuel} &= W_{i,rev}(T_0, P_0) + RT_0 \left[\sum_i n_i \ln \left(\frac{P_i}{P_i^0} \right) \right. \\ &\quad \left. - (O_{2,min}) \ln \left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2}^0} \right) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

로 주어지며 P_i^0 는 熱燒生成物 i 成分의 大氣中の 分壓, $P_{O_2}^0$ 는 大氣中の 酸素分壓이다. 熱燒反應이 다음식으로 表示될때는



(T_0, P_0)의 물의 有効에너지를 0로 보아 다음의 有効에너지는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} e_{fuel} &= H_f(T_0) + T_0 \left[x s_{CO_2}(T_0, P_0) + \frac{y}{2} s_{H_2O} \right. \\ &\quad (T_0, P_0) \\ &\quad \left. - s_{fuel}(T_0, P_0) - \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \right) s_{O_2}(T_0, P_0) \right] \\ &= RT_0 \left[x \ln \left(\frac{P_{CO_2}}{P_{CO_2}^0} \right) - \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. \ln \left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2}^0} \right) \right] \end{aligned} \quad (23)$$

Ⅴ. 에너지 有効利用의 質量兩面의 解析

熱力學 第一法則은 定常狀態에서 系에서의 에너지 入力量과 出力量은 같다는 에너지收支를 中心한 量的 側面에서의 解析은 했고(6) 質的 側面에서의 解析은 熱力學 第二法則에 依해서 이루어지는데 第二法則이 意味하는 것은 可逆操作에 의해 에너지는 만드지 劣化한다는 事實로 에너지 有効利用 方法이란 <系에서 에너지의 劣化를 積極抑制하는 것>뿐이다. 지금 混合物의 流動系의 有効에너지에 대해 質

量 兩面에서 解析을 하면 다음식으로 表示된다. (24)

$$e = \int_0^{\text{state}} (dh - T_0 ds) = h - T_0 s - (h_0 - T_0 s_0) = h - T_0 s - \sum x_j \mu_{j0}^* \quad (24)$$

萬一 混合物이 理想的으로 變化한다고 보면 다음 식과 같이 된다.

$$e_m(T, P, \bar{X}) = h_m(T, P, \bar{X}) - T_0 s_m(T, P, \bar{X}) - h_m(T_0, P_0, \bar{X}) + T_0 s_m(T_0, P_0, \bar{X}) - \sum_j X_j [h_j(T_0, X_j, P_0) - T_0 s_j(T_0, X_j, P_0) - \mu_{j0}] \quad (25)$$

$$e_m(T, P, \bar{X}) = \int_{T_0}^T \sum_j X_j C_{pj} \left[1 - \frac{T_0}{T} \right] dT + RT_0 L_n \frac{P}{P_0} - \sum_j X_j [h_j(T_0) - T_0 s_j(T_0, X_j, P_0) - \mu_{j0}] \quad (26)$$

여기서

\bar{X}, X : zero 分率,

$\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_{n-1})[-]$,

m 은 混合物이다. 식(26)을 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$e^m(T, P, \bar{X}) = \sum_j X_j e = \sum_j X_j [e_{j(\text{thermal})} + e_{j(\text{pressure})} + e_{j(\text{chemical})}] \quad (27)$$

여기서

$$e_{j(\text{thermal})} = \int_{T_0}^T \left[1 - \frac{T_0}{T} \right] C_{pj} dT: \text{熱에 대한 有}$$

効에너지

$$e_{j(\text{pressure})} = RT_0 L_n \frac{P}{P_0}: \text{壓力에 대한 有効에너지}$$

$$e_{j(\text{chemical})} = h_j(T_0) - (T_0 s_j(T_0, X_j, P_0) - \mu_{j0}):$$

化學反應에 대한 有効에너지

이로서 流動系가 어떤 操作으로 상태 1에서 상태 2로 變化되었을때의 有効에너지의 變化量은 다음식으로 表示된다.

$$\Delta \dot{E}_m = n_2 e_m(T_2, P_2, \bar{X}_2) - n_1 e_m(T_1, P_1, \bar{X}_1) \quad (28)$$

이 狀態變化量과 일과의 關係를 다음식 및 그림 3에 表示한다.

$$\Delta \dot{E}_m = W_{\text{min/max}} = -\{W + (W_{\text{min/max}} - W)\} = -(W + I) \quad (29)$$

여기서 $W_{\text{min/max}}$ 은 最小 또는 最大일**이고 W 는 실제 일, $I = W_{\text{min/max}} - W \geq 0$ 이다.

* 運動에너지와 位置에 관한 事項은 무시한다.

** 일이 系에 주어질때 $W_{\text{min}} < 0, W < 0$; 系에서 얻어질 때 $W_{\text{max}} > 0, W > 0$

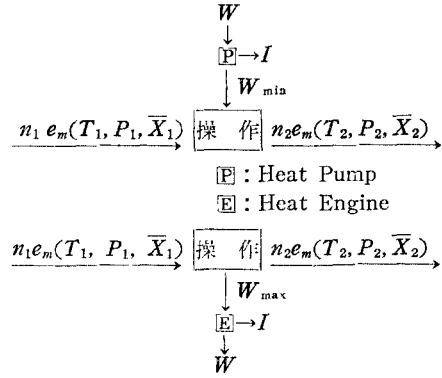


Fig.3 Change of Available energy and work

I 는 이 操作에 의한 質의 變化 즉 에너지의 劣化를 定量的으로 表示하는 것으로 有効에너지 損失이다.

식(27)과 식(28)에서 Process System에서의 有効에너지와 그 損失은 熱, 壓力 및 化學反應에 依해 個別的으로 定量的으로 求할 수 있으며 이 사이에는 加減性이 成立된은 안 수 있다. 따라서 個個의 有効에너지와 그 損失에 주의를 기울여 損失의 最小化를 기한다면 結果적으로 全體의 損失最小化와 연결지어지고 에너지 有効利用이 이루어 질다.

Ⅶ. 에너지의 經濟的 評價

에너지절약은 생각함에 있어 에너지절약 效果를 나타내는 指標의 選定도 重要하다. 各種 熱機關이나 plant의 熱效率, 冷凍機나 heat pump의 成能係數, 에너지의 有効比등으로도 表示되는데 이들에게 適用되는 에너지 利用評價의 表示法은 基本的으로 같이 共通의으로 效率로 다음과 같이 定義된다.

$$\text{效率 } \eta = \frac{\text{裝置 또는 系에 의해 遂行된 에너지傳達}}{\text{裝置 또는 系에의 에너지 入力}} \quad (30)$$

η 의 理論的 最高値가 1보다 클때는 이것을 成績係數, 1보다 작거나 같을때를 效率이라 부르고 있는 바 식(30)의 效率이 熱力學 第一法則에 基를 둔 것이기 때문에 第一法則 效率⁽³⁾이라 부르고 다음과 같은 缺點을 지적한 바도 있다. 즉 그 最大値는 系 및 溫度에 關係하며 1보다 크거나 작거나 같기도 되고, 에너지 利用의 可能한 效率을 支配하는

熱力學 第二法則의 구실이 적절하게 관여 되어 있지 않으며 바라는 계가 일과 熱의 어떤 組合인 復合系에 對해서는 一般化하기가 어렵기 때문이다. 따라서 Keenan⁽¹⁰⁾은 有效率이라 부르는 比率 $\epsilon = \Delta h / \Delta \phi$ 를 提案했다. 여기서 $\Delta \phi$ 는 斷熱膨脹일 때의 有效에너지 減少이다.

이 有效率은 熱力學의 第一法則 및 第二法則에 적용되는 最適值에 相對的인 性能의 尺度이며 이것을 一般化해서 그 出力이 熱 또는 일의 有效한 傳達로 어떤 裝置나 系에 對해서 다음과 같이 定義한다.

$$\text{有效率 } \epsilon = \frac{\text{주어진 裝置 또는 系에 의해 有效하게 傳達된 熱 또는 일}}{\text{주어진 裝置 또는 系와 같은 에너지 入力を 使用하는 任意의 장치 또는 系에 의해 같은 機能에 對해 有效하게 傳達하는 最大로 可能한 熱 또는 일}}$$

(31)

이 정의에서 明確한 것은 ϵ 의 最大值는 모든 경우에 1이며 比를 구성하는 分子는 식(30)의 η 와 같고 分母에 새로이 直接 또는 熱力學의 法則에 의거 적용되는 限度를 포함하고 있다. 그러므로 有效率은 理想的인 것에 相對的인 임의의 裝置의 性能의 質에 對해 直接的인 評價를 부여하여 어떤 裝置의 原理의 改善의 여지가 有나를 表示함으로 燃料의 浪費의 尺度로 삼을 수도 있다. 이 有效率은 熱力學의 第二法則에 기초를 두는 것이기 때문에 第二法則 有效率⁽⁹⁾이라 부르기도 했다.

VII. 結 論

에너지는 創造되거나 消滅되지는 않는다는 熱力學 第一法則이 있더라도 에너지의 生産, 消費 및 節約에 對해서 생각지 않을 수 없다. 에너지 절약에 對해서 考察하면 産業構造의 檢討는 물론 積極的으로 熱에너지 利用에 관한 效率化나 評價方法의 確立이 필요한 것이다.

에너지 有效利用에 관한 熱力學的 方法은 問題의 完全한 解決을 주는 것이 아니고 다만 Process에서

의 에너지 有效利用의 程度, 損失의 程度와 그 原因 등 定量的 評價를 주는데 不適當하다.

熱力學 第一法則은 熱의 收支를 精算함으로 에너지 入力量을 적극적으로 減少시키게 하고 熱力學 第二法則에서는 에너지의 質的인 解析으로 에너지의 劣化를 抑制하는데 있음을 밝혔다. 한편 에너지의 質·量兩側面에서 解析하면 Process System에서의 有效 에너지와 그 損失은 熱, 壓力, 化學反應에 對해서 個別的으로 定量的으로 구할 수 있고 그 사이에 加減性이 成立되기 때문에 有效에너지와 그 損失에 주의를 기울여 損失의 最小化를 기하면 結果적으로 全體의 損失最小化와 연결지어지며 에너지 有效利用에 達할 수 있다.

參 考 文 獻

- 1) Angrist, S. W., "Technology Tutor," 1-2 (1970)
- 2) Cambel, A. B., "Energy RD and National Program," U.S. Government Printing Office, (1964)
- 3) 森, 日本機械學會誌, 78-678, p.381, (1975)
- 4) 石谷, 機械の研究, 28-7, p.813, (1976)
- 5) Baehr, H. D., Thermodynamik, (1966), Springer-Verlag.
- 9) K. Shiroko and T. Umeda, "Energy Conversion in Petroleum Refineries," Chem. Economy & Eng. Review, 8-11, (1977)
- 7) 城子, 伊藤, "蒸溜プロセスの省エネルギー" に関する基本概念, 化學工學, 41, 9, (1977)
- 8) R. A. Gaggioli and P. J. Petit, "Use the Second Law, first," Chem. Eng. Sci., 29, p.1613. (1974)
- 9) Ford, K. W. "Efficient Use of Energy," (1975), American Institute of Physics.
- 10) Keenan, J. H., "Mechanical Engineering," 54-3, p.196, (1932)