

# 冷暖房에 消費되는 에너지節約에 관한 熱力學 研究

裴 洵 勳\*

(1974. 8. 25. 接受)

## A Second-Law Analysis of the Energy Consumption in Heating and Cooling Systems

Soonhoon Bae

### Abstract

From the point of view of the second law of thermodynamics, house heating and cooling systems were analysed for saving energy. The analysis provides a theoretical basis for the heat-pump application. Also the efficiency of energy use is defined more rigorously by comparing the thermodynamic availability actually consumed in heating and cooling with the minimum thermodynamic availability required to do the same heating and cooling.

It was found that the present "Ondol" heating system has a heating efficiency of around 8% according to the definition described here. Several schemes to improve the efficiency are presented.

### 1. 序 論

近來에 와서 더욱 심각하게 대두되는 문제이기  
는 하나 오랜세월 人間文明에서 不斷히 努力하는

問題中的의 하나는 에너지節約이다. 現代의 機械  
文明이 豊富한 油類에너지源에 基盤을 두고 發展  
하여서 지금에는 消費量의 증가가 莫大하여 不遠  
供給이 需要를 따르지 못할 것이 예측됨에 따라

### <記號說明>

$A$  availability(可用性), kcal/kg

$C_p$  比熱 kcal/kg °K

$E$  에너지, kcal/kg

$\Delta h$  엔탈피 差, kcal/kg

$I$  非可逆性(irreversibility), kcal/kg °K

$m$  質量, kg

$N$  mole 數

$P$  壓力, kg/cm<sup>2</sup>

$Q$  熱量, kcal

$\Delta S$  엔트로피差, kcal/kg °K

$\Delta \dot{S}$  單位 엔트로피의 時間에 대한 變化量,  
kcal/m<sup>2</sup> °K hr

$T$  溫度, °K

$U$  熱傳達係數, kcal/m<sup>2</sup> °K hr

$V$  體積, m<sup>3</sup>

$\epsilon$  熱交換效率

$\mu$  chemical potential, kcal/mole

$\varphi$   $\int_{T_0}^T \frac{C_p}{T} dT$ , kcal/kg °K  
添 字

$a$  大氣

$c$  燃燭가스

$in$  고래 入口

$j$  各 要素成分

$max$  最大値

$o$  標準條件

$out$  고래의 出口

\* 正會員, 韓國科學院

더욱 에너지節約에 觀心을 갖게 되었다. 그러나 에너지節約은 經濟, 社會的인 側面에서만 檢討되고 技術的인 面에서는 斷片的인 事例에 대한 研究는 進行되어 왔으나 根本的인 科學的인 根據가 없다. 本 論文에서는 이러한 根據를 마련하고자 冷暖房에서 에너지利用에 대한 熱力學的인 分析을 하여 에너지를 얼마나 效率的으로 使用할 수 있는가를 論하고자 한다.

보통 에너지 利用에서 效率은 熱機關에서는 第二法則으로 分析하나 直接 加熱 裝置에서는 第一法則的 效率만을 고려한다. 따라서 冷暖房에서도 暖房의 경우에는 熱精算만을 考慮하므로 熱力學 第一法則만을 適用하여 效率을 算出하는데 冷房에서는 冷凍機가 逆熱機關이므로 第二法則的 效率을 計算한다. 그러므로 흔히 쓰는 熱效率이란 用語는 매우 모호하게 쓰여지고 있고 科學的인 意味가 적다. 이 點에 관하여는 참고문헌 (1)에서 Berg가 좀더 正確한 定意를 하고 있다.

여기서 根本的인 概念은 엔트로피이다. 에너지 自體는 生成되거나 消費되는 것이 아니므로 자주 論議되는 에너지 消費라는 것은 事實上 에너지源의 消費이고 여기서 消費는 可用하기 쉬운 에너지 形態에서 使用 不能의 에너지 形態로 變化하는 것을 意味한다. 이 使用 可能의 與否를 測定하는 尺度가 熱力學에서의 엔트로피이다. 이 엔트로피를 定義하는 根本은 熱力學 第二法則에 있기 때문에 엔트로피의 變化, 좀 더 나가서는 availability의 變化를 解析하는 것을 第二法則的 效率이라 하였고 單純히 熱量의 移動만을 考慮하는 效率을 第一法則的 效率이라 하였다.

## 2. 冷暖에 있어서 에너지 利用

冷房이나 暖房에서 根本的인 에너지 利用 形態는 熱 移動이다. 어떤 熱源으로부터 高級 에너지를 熱의 形態로 房안에 快適 條件을 維持하도록 傳達하는 것이므로 熱力學 過程으로 보면 非可逆 過程이다. 따라서 이러한 非可逆性(irreversibility)을 될 수 있는 한 감소시키면 最大의 效率을 얻을 수 있는 것이다. 熱機關에서 效率은 보통 入熱에 대한 生成일의 比率로 計算하는데 여기서

는 일의 生成이 없기 때문에 效率은 冷房 또는 暖房 過程에서 實際 경우의 熱의 要求되는 量과 엔트로피의 增加가 最少로 되는 理想的인 경우에서 熱의 必要量을 比較하여 效率을 算出할 수 있다.

우선 熱量만을 考慮하면 熱交換器에서 定義하는 熱交換率을 計算할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{(T_{in} - T_{out})}{(T_{in} - T_R)} \quad (1)$$

理想的인 경우  $T_{out} = T_R$  이고 따라서  $\epsilon = 1$ 이다. 이것은 熱交換面積이 매우 넓고 流速이 작은 경우이다. 대개 온돌의 경우 굴뚝을 통한 熱損失이 약 5%로 熱交換率이 95%되는 셈인데 이에 따라서 굴뚝의 通氣力이 부족하여 改良式에서는 一般적으로 이 效率이 低下되는 경향이 있다. 온돌은 自然對流로 通氣하는 熱交換이기 때문에 이 效率을 어느 程度 작게 하더라도 굴뚝의 通氣力을 크게 하여야 한다.

이때에 熱交換에서 일어나는 엔트로피의 增加는 다음 式으로 計算할 수 있다. (2)

$$\Delta S = U(T_C - T_R)^2 / T_C T_R \quad (2)$$

여기서  $T_C$ 는  $T_{in}$ 과  $T_{out}$ 의 對數平均値(logarithmic mean temperature)이다.  $\Delta S$ 는 단위면적당 증가한 엔트로피이다.

위의 두 考慮는 熱傳達에 根本的으로 수반하는 非可逆性에 대한 것이고 여기에 熱傳達의 方向에 따라서 有用하고 無用한 것이 區分된다. 다시 말하자면 熱傳達가 땅속이나 外氣로 되는 경우 이 熱은 第一法則的 순수한 熱損失이다. 대부분의 研究者들이 여기에 많은 觀心을 가지고 研究하여 왔는데 그 中 가장 正確한 定義를 한 文獻<sup>3)</sup>에서는 연료로부터 發生한 熱量 中에서 損失되는 熱量과 暖房에 利用되는 熱量을 나누어 總發生 熱量對 有效熱量의 比를 效率로 定義하였다. 여기서 有效熱量을 어떻게 定義하고 算出 또는 測定하는가에는 많은 論議가 있지만 本 論文의 主題에서 벗어나므로 여기서는 討論하지 않는다.

위에서 指摘한 非可逆性 外에도 燃燒할때 생기는 非可逆性, 流體(燃燒가스)가 流動할때 非可逆性等 이런 것을 모두 考慮하여 效率은 어

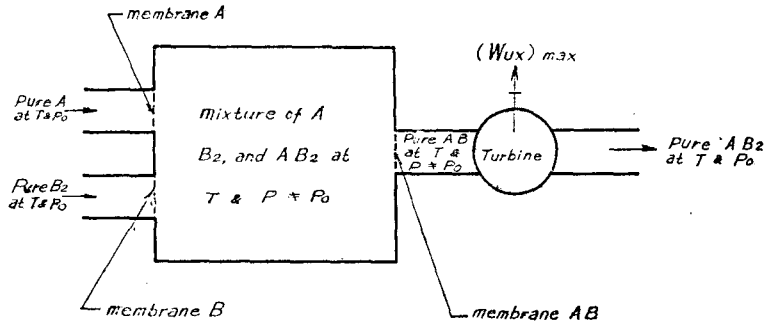


그림 1. The van't Hoff Reaction Chamber  
(화학반응  $A+B_2 \rightleftharpoons AB_2$ )

면 에너지源을 理想的으로 利用하여 얻을 수 있는 最大 效果和 實際 效果를 比較하여 定해야 할 것이다. 여기서 理想的인 경우는 예를 들면 燃燒 대신에 van't Hoff의 反應爐를 써서 可逆反應을 일으키고 여기서 얻은 일로 逆카르노사이클로 行動하는 heat-pump로 熱을 얻어서 平衡狀態에서 房안에 傳達하는 경우이다. (그림 1) 이 理想的인 경우는 van't Hoff 反應爐의 壓力이 너무 높고 카르노사이클 heat-pump의 熱交換器가 無限히 커지고 理想的인 作動 流體가 없는 點等 때문에 實際的이 아니기는 하지만 過去의 暖房 系統에서 重要 改善點을 보여 준다는데 意義가 있다. 어디서 重大한 非可逆性이 생기는가를 쉽게 算出할 수 있다.

heat-pump를 使用하여 效率을 計算하기 위하여 그림 2와 같은 장치를 應用 하면

$$\frac{Q_C}{Q_R} \geq \frac{1 - (T_a/T_R)}{1 - (T_a/T_c)} \quad (3)$$

윗식에 숫자를 代入하면  $Q_C/Q_R \geq 0.13$ 이다. 따라서 燃燒熱을 直接 室內을 加熱하는데 利用하는 경우에는 같은 熱을 最大로 有効하게 使用하는 경우에 比해서 약  $\frac{1}{8}$ 의 效果를 얻는 셈이다. 따라서 연소열 100%가 室內에 전달 된다 하더라도 이때 效率은 13%밖에 안된다. 여기서 van't Hoff 反應爐와 燃燒를 比較하면 燃燒에 있어서 非可逆性을 고려한 效率은 약 75%이므로 全體의 으로 보아 燃料를 完全 燃燒시켜 100%의 燃燒熱

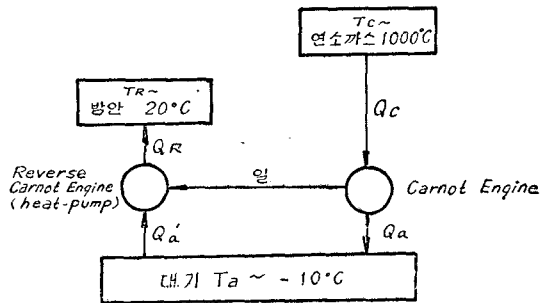


그림 2. Heat Pump Application

을 室內에 傳達한다고 하여도 非可逆性의 生成에 依해 그 效率은 약 10%인 셈이다.

그러면 이러한 非可逆性을 測定하는 變數는 없을까? 위에서 言及된 엔트로피는 이런 物理現象의 測定 基準이 되기는 하나 暖房시스템을 考慮하여 效率을 計算하는데는 適合한 變數가 아니다. availability라는 概念은 여기에 매우 有用하다.

### 3. Availability의 變化

Availability(可用性)은 Gibbs<sup>4)</sup>가 처음 導入한 概念으로 “物質의 可用한 에너지”라고 紹介하였는데 後에 Keenan<sup>5)</sup>이 더욱 發展시켜 一般 熱工學에 有用한 概念이 되었다. 위에서 考慮된 非可逆性은 availability를 計算하여 數值를 얻을

수 있다.

大氣의 溫度를  $T_0$ , 壓力을  $P_0$  라고 하면 availability  $A$  는

$$A = E - T_0 S + P_0 V - \sum_j \mu_0^j N^j \quad (4)$$

위 (4)式에서  $\mu_0^j$ 와  $N^j$ 는 各各 構成 成分의 chemical potential 과 mole 數를 나타낸다. 이 式에서 各項은 各各 物理的인 意味를 갖는데 에너지項  $E$ 는 過去에 취급하던 대로 熱力學 第一法則에 依據하여 計算할 수 있으나 두 項  $T_0 S$  는 本論文에서 論한 바와 같이 非可逆性의 生成을 考慮하여 算出할 수 있는데 이것이 本論文에서 從前과 달리 效率 計算에 考慮되어야 한다고 主張하는 點이다. 세 項  $P_0 V$ 는 壓縮과 膨脹에 依한 直接的인 일인데 暖房시스템에서는 그 量이 다른 項에 比해서 매우 적으므로 무시해도 된다. 마지막 項은 chemical potential 의 項으로 燃燒時 氣의 擴散에 依하여 생기는 availability 의 損失을 算出할 수 있게 한다.

#### 4. 溫突에서의 數值計算

온돌의 개략도는 그림 3과 같다. 點 ①에서 空氣가 들어와 연소실에서 燃燒가 되어 작은 管을 通하여 고래로 들어가 熱을 擴散시킨 다음 개자리를 통하여 굴뚝으로 빨려 들어가 大氣中에 排出되게 된다. 그러므로 燃料과 空氣의 通路를 따라서 availability 를 計算하면 그 變化를 찾아볼 수 있다.

우선 點 ①에서의 溫度를  $-12^\circ\text{C}$ 로 잡고 空氣에서 燃燒가스의 溫度는 約  $704^\circ\text{C}$ 이므로 點 ②에서 溫度는 이 溫度와 같다고 假定해도 크게 오차는 없을 것이다. 굴뚝 入口에서는 보통 잘 設計된 溫突에서는 室內 溫度와 같으므로 點 ③에서

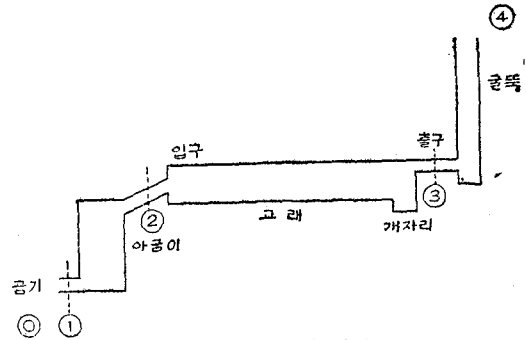


그림 3. 온돌의 개략도

표 1. 各點에서 狀態

點	온도( $^\circ\text{K}$ )	엔탈피(kcal/kg)	$\phi$ (kcal/kg $^\circ\text{K}$ )
①	261	62.5	0.5675
②	977	243.5	0.8970
③	294	70.4	0.5963

溫度를  $21^\circ\text{C}$ 라 놓고 굴뚝 外氣는 空氣에서와 마찬가지로  $-12^\circ\text{C}$ 로 假定한다. 이런 假定은 實際의 경우 약간의 變化는 있으나 여기서 計算하고자하는 availability 의 變化量을 物理的인 解析이 可能한 程度로 正確한 값을 얻을 수 있다. 以外에도 Brayton cycle의 計算에서 마찬가지로 燃燒가스의 性質을 空氣의 性質과 같다고 假定한다. 溫突에서의 流體의 壓力은 事實上 均一하다고 본다. Gas tables<sup>6)</sup>로부터 표 1을 얻을 수 있다.

위의 표 1로부터 非可逆性을 計算하여 정리하여 표 2에 나타내었다.

표 2를 檢討하면 燃燒 過程에서 生成된 非可逆性은 總 availability 의 約 46%에 해당한다. 굴뚝 入口의 溫度를 室溫과 같이 잡았기 때문에 熱交換效率은 이 경우 100%인데 外氣가 室溫보다

표 2. 各過程의 變化

過程	質量 m	$\Delta h$	$m\Delta h$	$\Delta s$	$m\Delta s$	$Q/T_0$	I	
吸 氣	①-②	1	0	0	0	—	—	
燃 燒	①-②	—	0	0	—	0.3290	0.3290	
熱 交 換	②-③	1.023	-173.1	-177.0	-0.3017	-0.3076	-0.6798	0.3798
排 氣	③-④	1.023	-7.9	-8.1	-0.0288	-0.2950	-0.0313	0.0023

低溫이므로 排氣가 可能하다. 이 排氣로 因한 availability의 損失은 約 1%이다. 그러므로 나머지 53%中 一部가 房을 加熱하는데 쓰이고 大部分은 損失로 땅속 또는 고래의 壁으로 새여 나가는 셈인데 먼저 2章에서 說明한 대로 heat-pump 使用하는 경우와 直接 加熱하는 경우를 比較하면 直接 加熱하는 경우에 소모되는 availability의 15%이면 heat-pump로 같은 量의 加熱을 할 수 있다. 위 53%의 availability를 完全히 損失없이 房을 加熱하는데 쓴다고 하여도 效率은 8%밖에 안되는 셈이다. 實際는 아궁이에서 들어오는 熱의 20~30%가 房안에 傳達이 되므로 事實上 溫突의 效率은 約 2% 밖에 안되는 셈이다.

### 5. 結 論

本 論文에서는 溫突의 效率을 熱量만을 計算하는 熱精算 方式의 모순점을 指摘하고 availability의 損失을 計算하여 溫突에 使用되는 에너지源을 보존하기 위한 技術的인 根據를 마련하였다.

availability로 따지면 보통 溫突의 效率은 約 2%이다. 大部分의 availability 損失이 非可逆의인 燃燒와 一定量의 溫度差를 利用하여 直接 加熱하는 過程에서 일어난다. 따라서 溫突 改良은 熱精算을 따져서 直接的인 熱損失을 減少하여야 함은 勿論이지만 한 걸음 나가서 큰 改良은 燃燒를 可逆的인 化學反應으로 代替하고 直接 加熱 대신에 熱로 일을 얻어 그일로 heat-pump를 使用하여야 한다. 現實的으로 可逆的인 化學反應은

van't Hoff 反應爐와 燃料電池가 있기는 하나 아직 經濟的인 作動은 技術的인 많은 問題가 解決되지 않았으나 熱氣關 heat-pump 組合은 實用化되는 단계에 있다. heat-pump 만은 이미 오래전부터 使用하고 있는 것으로 家庭用 冷藏庫가 그 좋은 例이다.

### 謝 辭

本 研究는 科學技術處의 1974年度 研究開發事業의 一環인 溫突改良設計에 관한 研究 中의 一部로 進行되었다.

### 參 考 文 獻

1. C. A. Berg, A Technical Basis for Energy Conservation, *Technology Review*, pp. 15-23, Feb., (1974)
2. N. A. Hall and W. E. Ibele, *Engineering Thermodynamics*, p. 440, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. (1960)
3. 이택식, 온도의 열효율 향상에 관한 연구, 과학기술처 보고서, R-72-10, (1972)
4. J. W. Gibbs, *The Collected Works*, Yale University Press, Vol. 1, p. 53, (1948)
5. G. N. Hatsopoulos and J. H. Keenan, *Principles of General Thermodynamics*, Chapter 17, John-Wiley, New York (1965)
6. J. H. Keenan and J. Kaye, *Gas Tables*, John Wiley, New York (1945)