

# 물-물熱펌프의 産業體 廢熱利用에 관한 시스템 設計와 經濟性

趙 明 濟

<韓國動力資源研究所 에너지機器研究部>

## 1. 序 言

人間生活에 있어서 에너지 事情은 앞으로 점점 더 어려워짐이 틀림없다. 代替 에너지 研究開發 못지 않게 에너지 節約技術은 매우 重要하다.

열 펌프는 이미 1852年 Lord Kelvin이 冷凍機가 加熱을 위해 有效하게 利用될 수 있다는 것을 指摘하고 空氣-空氣 熱펌프를 처음으로 考案하였으며 1938年에 冷暖房으로 實用化되었다. 1973年 石油波動 以來 이의 研究開發 및 商品化가 活潑히 促進되었다. 에너지의 효율적인 利用裝置로서 世界各國事情에 따라 다르지만 熱펌프는 先進各國에서 널리 普及 使用하고 있음은 周知의 事實이다. 熱펌프는 熱源으로 空氣, 물, 太陽熱, 地熱 및 産業廢熱 등을 使用할 수 있고 熱源의 source와 sink의 構成이 多樣하다.

産業體에서 나오는 廢熱은 約 48%에 到達되며 工程用 溫水는 業體마다 共通적으로 必要로 하고 있으며 이의 發生을 위하여 비싼 기름 燃燒의 方式을 採擇하고 있음이 現實이다. 先進工業國의 경우 暖房 工程熱 및 溫水 製造面에서 全體 에너지 消費의 40%를 占有하며 더욱 기름과 가스消費로 볼 때 占有率이 70%란 엄청난 數値에 달하고 있다. 本論에서 蒸氣壓縮式 水對물 熱펌프를 中心으로 産業體에서 나오는 中低溫 廢水를 回收 活用하는 경우 시스템設計 및 性能과 經濟性에 대한 評價를 考察하였다.

## 2. 물-물 熱펌프의 活用分野 및 使用上の 條件

### 2.1. 活用分野

産業體 廢熱의 種類로는 冷却排水, 工程廢水, 熔接機冷却水, 壓縮機冷却水, 發電所廢熱, 冷凍機凝縮排水 등 多樣하다. 이러한 産業體廢熱은 産業體 全體로 보면 莫大한 量이 排出되고 있다. 예를 들면 化學, 鐵鋼, 섬유, 食品 등 工場의 廢水가 큰 比重을 차지하고 있다. 化學工場에서의 各種냉각기, 섬유工場의 梁色廢水 등은 그 排出溫度가 40~100°C까지 分布되어 좋은 熱源이 되고 있다. 또 食品工業分野의 경우 食品製造 工程中에 滅菌過程이 98~110°C, 洗滌 및 清掃過程은 50~90°C의 溫水, 冷藏冷凍過程에는 4~-20°C의 溫度가 所要된다. 아직 回收되지 않고있는 中低溫의 廢水는 熱源으로 매우 現實的이며 産業體에서 使用하는 冷水, 溫水製造 및 冷暖房에 使用된다면 많은 燃料節減을 期待할 수 있다. 大型冷凍機를 保有하고 있는 化學, 食品工場은 冷凍機의 凝縮器에서 나오는 熱을 熱펌프의 蒸發器側 熱源으로 使用할 수 있어 50~100°C의 溫水를 얻을 수 있으므로 매우 效果的이다.

食品業體의 廢熱水에는 濃縮管, 結晶管의 凝縮冷却水, 蒸溜塔의 冷却水 및 蒸發水蒸氣 등이 있으며 化學工業에서 廢熱種類는 多樣하나 大別

## ◆ 解 說

하년 廢蒸氣와 冷却水이다.

### 2.2. 裝置適用時의 考慮條件

가. 물의 狀態로 廢熱로서 熱源이 存在하여야 한다. 그 溫度는 높을수록 經濟性과 裝置性能이 良好하다.

나. 工程熱溫水의 取水溫度範圍는 現在 110°C 까지 可能하다.

다. 廢熱源과 需要處인 工程溫水使用處가 同時性이 成立되지 않을 경우에는 어느 한쪽에 熱貯藏槽가 設置되어야 한다.

라. 年間稼動率이 클 수록 에너지節減을 期待할 수 있으며 投資費償却이 빨리 이루어 진다.

### 2.3. 裝置의 適用事例

그림 1은 冷凍機의 凝縮器側에서 排出되는 27°C의 溫排水를 熱펌프의 凝縮器側에 供給하여 51°C의 高溫으로 昇溫시키는 過程 중 製品洗滌에 使用되는 溫水 및 蒸發器側에서 發生되는 低溫의 冷却水를 供給하는 系統圖이다.

産業 過程에서 流出되는 低溫의 排水를 熱펌프의 凝縮器에 供給하여 産業體에서 使用되는 溫水를 만들 수 있으며 同時에 蒸發器側에서 冷

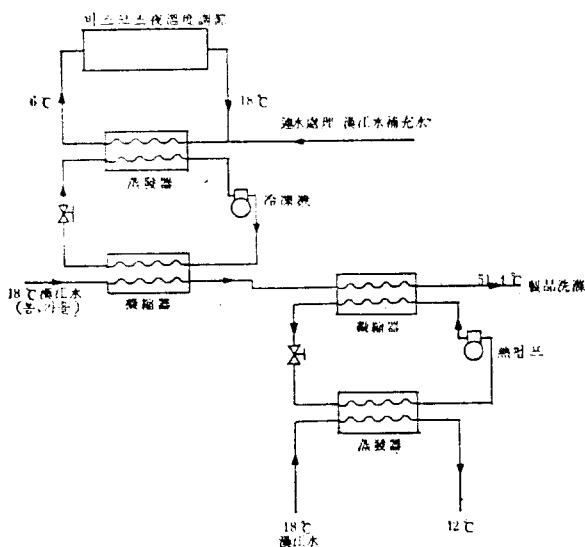


그림 1 産業體 冷溫水發生利用 系統圖

水를 얻어 活用할 수 있다. 이러한 低溫의 排水를 熱펌프의 熱源으로 使用하면 經濟的으로 利益을 얻을 수 있다. 이 경우는 W社의 本 裝置適用可能한 한가지 事例이며 實際 工程上 冷水(12°C 程度)를 얻기 위하여 數基의 冷凍器를 併用하고 있다.

## 3. 물-물 熱펌프의 系統設計

### 3.1. 冷媒 R-12 使用時의 系統 및 熱收支

가. 系統 設計基準

基本的으로 부여된 往復式 壓縮器의 仕様을 中心으로 系統의 熱 및 物質收支를 計算하여 궁극적으로 熱交換器의 諸元을 決定한다.

- 蒸發器 條件  
溫度 : 20°C, 壓力 : 5.8 kg/cm<sup>2</sup>
- 凝縮器 條件  
溫度 : 60°C, 壓力 : 15.6 kg/cm<sup>2</sup>
- 壓縮器 吐出條件  
溫度 : 74°C, 壓力 : 15.6 kg/cm<sup>2</sup>
- 壓縮器 吸入條件  
溫度 : 27°C, 壓力 : 4.4 kg/cm<sup>2</sup>
- 壓縮比 : 3.5
- 冷媒流量 : 1, 103 kg/h
- 壓縮機의 驅動馬力 : 13

나. Process Flow Diagram 및 熱收支圖表  
蒸氣壓縮式 熱펌프의 熱力學的 基本사이클은 冷凍사이클과 똑 같으며 Process Flow Diagram은 그림 2와 같다. 또 P & I 다이어그램은 그림 3과 같으며 熱 및 物質收支 計算結果는 표 1에 綜合하였다.

### 3.2. 熱交換器(凝縮器, 蒸發器, 液-蒸 熱交換器)의 基本設計

熱交換器의 設計를 위하여 對數溫度差의 方法을 使用하였다. 基本設計의 骨子를 要約하면  $Q = U_0 A \Delta T$ 에서  $Q$ 와  $\Delta T$ 를 計算할 수 있으므로  $U_0 A$ 를 決定하기 위하여  $U_0$ 를 假定하면  $U_0 =$

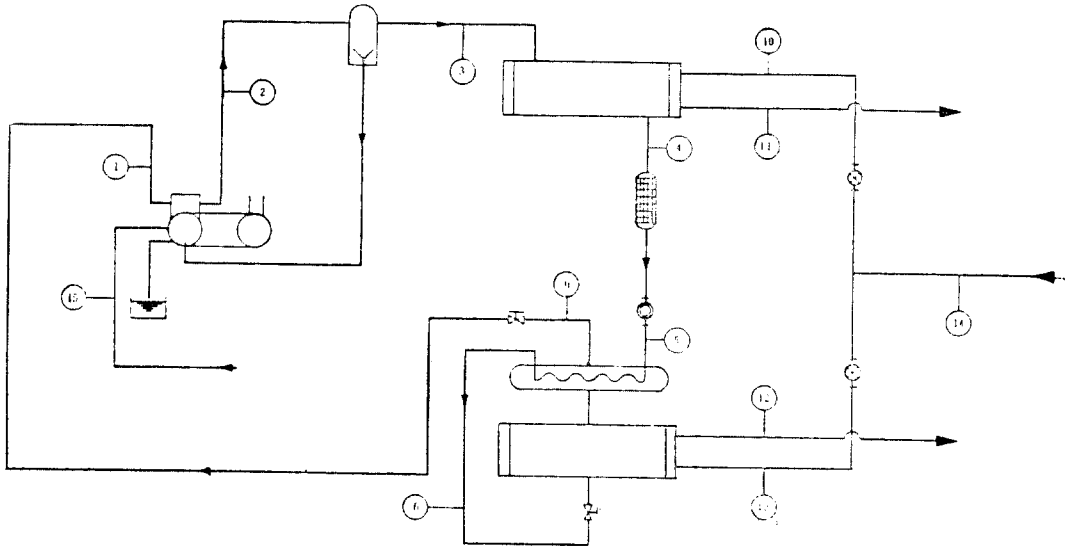


그림 2 Process flow diagram.

표 1 열 및 물질수지 계산결과

항목	공정번호	단 위	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
유	체		R-12	R-12	R-12	R-12	R-12	R-12	R-12	R-12
유	량	kg/hr	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103
온	도	°C	27	74	60	50	50	46.24	20	20
압	력	kg/m <sup>2</sup> ab	4.39	15.55	15.55	15.55	15.55	15.55	5.79	5.79
상	태		증기	증기	증기	액체	액체	액체	액체	증기
엔	탈	Kcal/kg	48.189	52.094	52.094	20.29	20.29	18.86	18.86	46.762
열	용	Kcal/hr	53,152	57,460	57,460	23,380	23,380	20,803	20,803	51,578

항목	공정번호	단 위	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
유	체		R-12	물	물	물	물	물	물
유	량	kg/hr	1,103	1753.99	1753.99	6155.18	1655.18	7909.17	
온	도	°C	27.5	30	50	25	30	30	
압	력	kg/m <sup>2</sup> ab	5.79	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
상	태		증기	액체	액체	액체	액체	액체	액체
엔	탈	Kcal/kg	48.187	30.00	50.0	25.00	30.0	30.0	
열	용	Kcal/hr	53,152	52,620	87,700	153,880	184,655	237,275	

$f(h_i, h_o)$ 가 算出된다.  $f(h_i, h_o)$ 는 레이놀즈수, 누셀트수 및 프란틀수의 函數이다.  $R_d = \frac{U_c - U_b}{U_c \times U_b}$ 에서  $R_d$ 는 資料에서 定하여짐으로 左邊과 右邊이 같아질 때까지  $U_b$ 를 假定하면서 計算을 反復하므로써 궁극적으로  $A$ 를 얻었다. 同時에 壓力損失의 許容範圍를 計算하여 檢討하였다. 但,

위의 記號는

$Q$ : 所要熱量

$U_b$ : 總括 熱傳達係數( $U_c$ 는 清潔時의 값)

$\Delta T$ : 對數平均溫度差

$h_o$ : 管外境膜熱傳達係數

$h_i$ : 管內境膜熱傳達係數

◆ 解 說

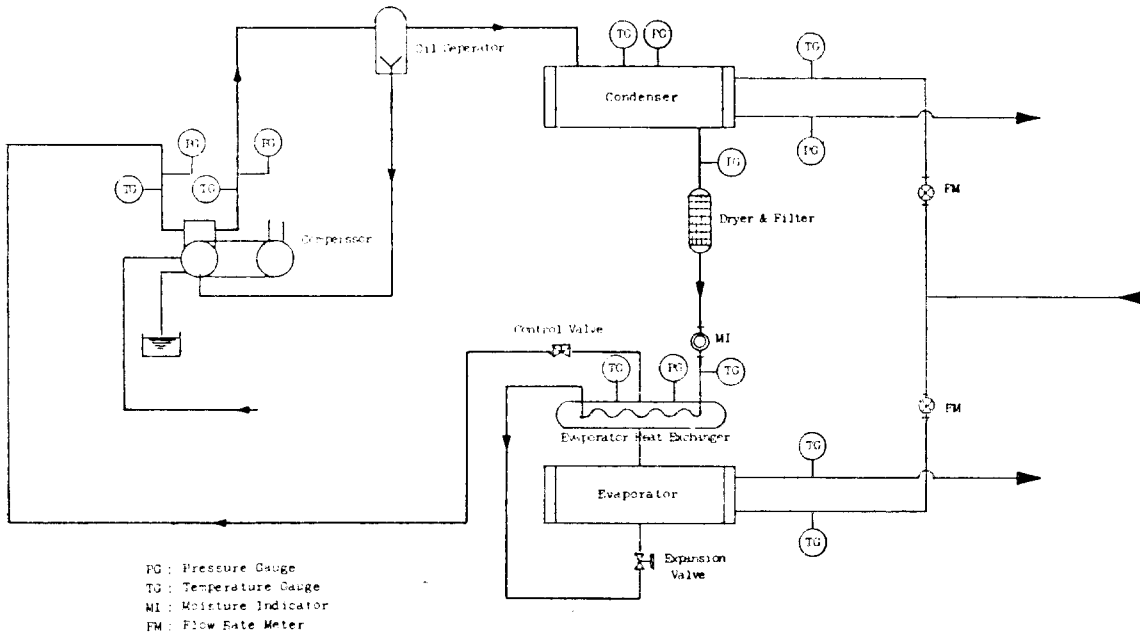


그림 3 P & I diagram.

$R_a$  : 不潔抵抗

$A$  : 必要傳熱面積

- 패스수 {
  - 胴側 : 1 패스
  - 우브側 : 6 패스
- 튜우브 {
  - 外徑 : 15.875 mm
  - 두께 : 16 BWG
  - 길이 : 3.5 m
  - 갯수 : 38 개
  - 피치 : 21 mm
- 妨害板 {
  - 간격 : 76 mm
  - 갯수 : 43 개
  - Cut : 45%(side-side)

- 패스수 胴側 : 1 패스  
 튜우브측 : 1 패스
- 튜우브 {
  - 外徑 : 15.875 mm
  - 두께 : 16 BWG
  - 길이 : 2.5 m
  - 갯수 : 7
  - 피치 : 21 mm
- 妨害板 : 0
- 支持臺 : 必要
- 配列 : 三角配列

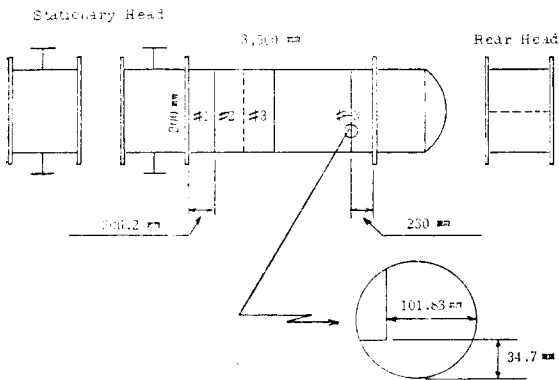
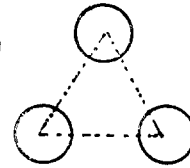


그림 4 凝縮器

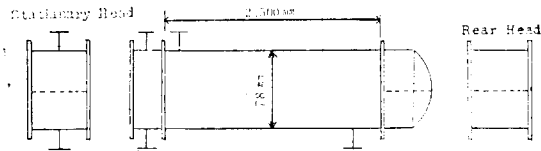


그림 5 蒸發器

- 패스수 {
  - 胴側 : 1 패스
  - 튜우브측 : 4 패스
- 튜우브 {
  - 外徑 : 15.875 mm
  - 두께 : 16 BWG
  - 길이 : 3 m
  - 피치 : 21 mm
- 妨害板 : 0
- 配列 : 三角配列

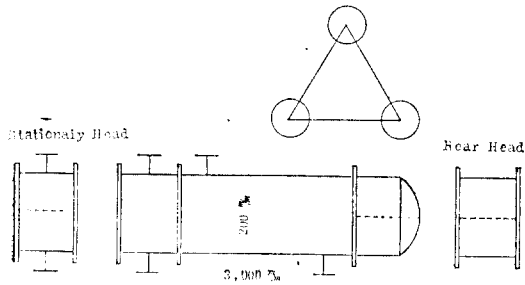


그림 6 液-蒸 熱交換器

Unit type	Max. temp. lift	Type of refrigerant used
A	47.2°C	R-500
B	50.0	R-12
C	55.5	R-12/R-14
D	72.2	R-114

위의 경우는 單段 往復動式 壓縮機의 경우이며 遠心式인 경우 R-12 使用時 40°C 로서 多少 制限을 받는다.

#### 4. 裝置性能 및 經濟性 評價

##### 4.1. 成績係數曲線

前章의 仕様을 갖는 裝置에 대한 溫水出口溫度, 源水出口溫度 및 成績係數(coefficient of performance; COP) 相關性을 計算한 結果는 그림 7 과 같다. 그림 7 과 같이 溫度差高(source 入口溫度와 sink 出口의 溫度差 temperature lift) 가 낮을 수록 COP가 높아진다. 溫度差高로 溫水出口 溫度와 源水出口溫度로 보는 경우 實際 商品의 경우 最大溫度差高는 아래와 같이 使用되는 冷媒의 種類에 따라 差異가 있다.

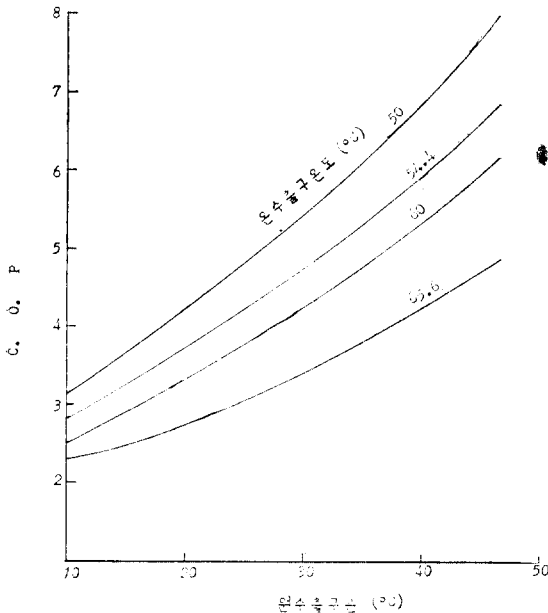


그림 7 열펌프의 성능곡선

##### 4.2. 裝置의 經濟性

裝置의 經濟性은 産業體가 廢熱을 回收할 경우 投資價値의 有無를 判別하는데 重要한 尺度가 되고 있다. 本節의 경우 기름을 使用하여 溫水를 얻는 경우와 比較하게 되므로 기름값은 勿論 電力費, 裝總投資費, 投資回收期間 그리고 成績係數 사이의 關係를 導出하여 評價하였다.

가. 評價基準

本 評價에 使用되는 因子는 다음과 같은 基準에 의해 計算하였다.

- 重油費 : 200
- 보일러 效率  $\eta$  : 85%
- 投資費  $I$  : \$ 632/kw  $\times$  700 원/  
\$ = 442,400 원/kw
- 割引率  $r$  : 12%/年
- 重油의 發熱量  $q$  : 9,700 kcal/kg

나. 回收期間 計算

電力費, 重油費, 回收期間, 投資費, 割引率 및 成績係數사이에는 다음과 같은 關係式이 成立된다.

$$M_c = 24 \times 30 (\text{cop} \times F_c - E_c)$$

$$M_c [(1-r_m) + (1+r_m)^2 + (1+r_m)^3 + \dots + (1+r_m)^n] = 442,400$$

$$\therefore (1-r_m)^n = 1 - \frac{442,400 r_m}{M_c (1-r_m)}$$

단,  $M_c$  : 月回收額

$$F_c : 200 \times 860 / 9,700 \times 0.85 = 20.86 (\text{원/kwh})$$

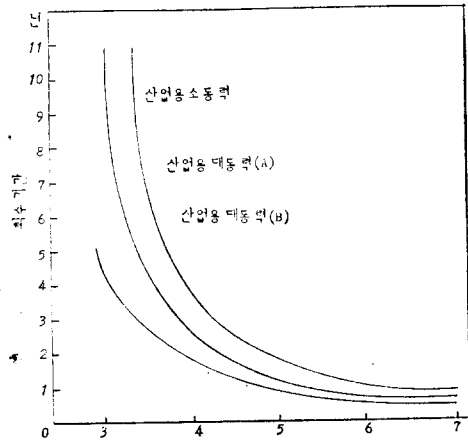
$E_c$  : 電力費

$r_m$  : 月割引率

$n$  : 月數

## ◆ 解 說

電力費는 産業用小動力, 産業用大動力(A) 및 (B)에 따라 62.6 원/kwh, 54.4 원/kwh, 및 48.1 원/kwh로 基準하였다. 電力費에 따른 裝置回收期間 對 成績係數 關係는 그림 8에 表示한다.



C. O. P.

그림 8 열펌프의 경제성 곡선

## 5. 結 言

가. 열펌프 시스템의 성능은 最適設計를 하므로서 理論的, Rankine C.O.P에 近接시킬 수 있

다.

나. 産業體 中 低溫 廢熱回收利用에는 熱펌프가 매우 有望하며 冷溫水를 同時에 利用하는 경우는 더욱 有利하다.

다. 우리나라 産業界에서 普通 投資回收期間을 3年으로 본다면 電力施設容量을 500 kw 以上の 産業用 小動力, 大動力의 경우 熱펌프의 成績係數는 約 3.5 程度가 下限으로 볼 수 있다.

라. 空氣 뜨는 물 熱源의 家庭用 熱펌프는 電力費가 비싸므로 아직은 實用性이 없다.

## 參 考 文 獻

1. US Dept of Commerce, Industrial Application Study, Vol. III, Technology data base Evaluation of Waste Recovery System, January, 1977.
2. 韓國動力資源研究所, 熱펌프의 國內適用에 關한 實驗研究, 報告書 KE-81-14.
3. Ernest E. Rudwig, Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants.
4. Westing Novse Products Brochure, Industrial Heat Pump.

## 大韓機械學會 論文集 購讀 申請案內

大韓機械學會 論文集은 1977年度 부터 學會誌와 分離하여 發行하고 있음을 會員 여러분께서는 잘 알고 계실 것으로 思料됩니다.

學會誌는 會費를 納付한 會員에게 無料로 配布하여 드리고 있으나, 論文集은 購讀 申請을 받아 申請한 會員에 限하여 配布하오니 分會를 통하여 또는 學會에 直接 申請하시기 바랍니다.

1. 1983년도 論文集 : 4卷 發行
2. 1983년도 論文集 : 購讀料 : 7,000원
3. 購讀申請 : 本 學會 事務局에 書面이나 電話로 申請.
4. 購讀料納付 : 直接 納付하거나 “대체계좌 508903번”(우체국에서 불입하되 수수료는 학회부담)으로 納付.

※ 論文集은 卷當으로 購入하실 경우 2,000원이며 ‘今年度 以前 發行分도 卷當 2,000원입니다.