

<論 文>

小規模 太陽熱 給湯시스템의 最適設計에 관한 研究

徐 廷 一* · 李 永 秀**

(1984年 5月 11日 接受)

A Study on the Optimum Design for a Solar Domestic Hot Water System

Jeong Il Seoh and Young Soo Lee

Abstract

This paper presents a typical solar domestic hot water system and estimates their performances with variance of collector size, storage volume, collector tilt and other factors. The analysis is performed by the computer simulation for which conceptual system against 8760 hourly solar intensities and ambient temperature for a model year stored in the computer has been running. System performance is analyzed on hourly, monthly and yearly basis respectively and at the same time, the economics of various systems are evaluated. And also, this paper shows how an optimized design can be selected for any locality for which solar data and collector performance are provided.

The results of this study are as follows,

- (1) Storage volume of 45 liter per square meter of solar collector lead to the best design.
- (2) Tilting the collectors to the same angle of the latitude is generally the best.
- (3) Optimal size of collector is approximately 6.68~8.35m², when the latitude is 37.6°N and storage volume is 300 liter.
- (4) The performance of a solar domestic hot water system does not depend on the hourly usage but the daily usage.

記 號 說 明

A : 太陽熱 集熱器 面積(m²)
 C_{min} : 熱交換器의 最小 熱容量 率(W/m²°C)
 C_p : 熱傳達媒의 比熱(kJ/kg° C)
 D : 黃道 傾斜角

F_R : 集熱效率 修正係數
 $F_{R'}$: 集熱 熱交換 效率係數
 $F_{R'}/F_R$: 集熱 熱交換 效率修正係數
 G : 單位 集熱面積當 集熱媒體 流量(kg/s)
 H : 時間角
 H_h : 水平面 日射量(W/m²)
 H_T : 傾斜面 日射量(W/m²)
 L : 緯度

* 正會員, 漢陽大學校 工科學 機械工學科

** 正會員, 漢陽大學校 大學院

- Q_u : 太陽熱 集熱量(W)
 T : 集熱器 傾斜角
 T_a : 外氣溫度(°C)
 T_{env} : 貯藏탱크 주위溫度(°C)
 T_m : 市供給水 溫度(°C)
 T_s : 貯藏탱크 溫度(°C)
 T_{set} : 設定溫度(°C)
 T_i : 集熱器 入口의 溫度(°C)
 T_o : 集熱器 出口의 溫度(°C)
 U_L : 集熱器의 熱損失係數(W/m²°C)
 α : 集熱板의 吸收率
 ϵ_c : 熱交換器 有效係數
 η : 集熱器 集熱效率
 τ : 透明板의 透過率
 $(\tau\alpha)$: 透過—吸收率
 $(\tau\alpha)_n$: 法線入射時 透過—吸收率

1. 序 論

太陽熱의 利用方法은 極히 簡單한 方法에서 부터 複雜性을 지닌 方法에 이르기까지 여러 方法들이 있으나 그중 太陽熱 給湯시스템은 어느 季節에나 必要하고, 設備의 使用期間이 길며 그 利用率이 높다. 또한 日日 一定量의 溫水를 持續的으로 利用하므로 보통 太陽熱 集熱器內를 循環하는 熱傳達媒體의 平均溫度가 낮아 集熱效率도 높고, 특히 氣候條件이 太陽熱 利用에 適合한 우리나라와 같은 나라에서는 給湯시스템에 適用하는 것이 暖房시스템에 應用하는 것보다 經濟的인 動力資源研究所의 研究結果에서 밝혀진바 있다.

現在 普及되고 있는 給湯시스템에는 集熱된 熱의 傳達方法과 貯藏方法에 따라 여러 種類가 있으나 Fanney와 Liu⁽¹⁾는 서로 다른 6個의 시스템에 대한 시뮬레이션에 의하여 그 性能을 豫測하고 이 시스템의 裝置들을 製作하여 設置, 實驗한 結果 熱交換器의 有效性, 템퍼링 벨브의 有無, 貯藏탱크의 容量등을 그다지 主要한 因子가 아님을 밝히고 있다. 또한 Buckles와 Klein⁽²⁾은 4가지 種類 즉 1개 탱크—外部 熱交換式, 2개 탱크—外部 熱交換式, 1개 탱크—內部 熱交換式과 2개 탱크—內部 熱交換式의 4方式에 대하여 이들에 대한 性能을 比較한 結果, 큰 差異는 없고 또한 熱交換器가 設置된 場所에는 無關한 것으로 判明되었다.

本 研究에 있어서는 2개의 貯藏탱크와 外部 熱交換器로 構成된 家庭用 太陽熱 給湯시스템을 시뮬레이션 모델로 理論的인 解析을 하고 設計因子들의 값들을 變

化시킴으로써 각각의 性能을 計算할 수 있었다. 또 이 性能 計算值에 의하여 最適設計 因子值들을 求할 수 있었다. 또한 1983年 1年間 서울地方의 每時間 日射量과 氣溫을 使用하였다.

2. 理論解析

太陽熱 給湯의 性能을 評價하기 위해서는 傾斜面 入射熱량을 算出하여 熱平衡을 誘導하여야 한다.

그러나 傾斜面 日射量에 대한 測定資料는 별도로 마련되어 있지 않으므로 水平面 日射量으로 부터 計算할 수 밖에 없다. 南向 傾斜面에서의 日射量을 산정하는 方法은 다음과 같이 구할 수 있다.

南向面의 傾斜面 日射量 H_T 는

$$H_T = H_h \times \frac{\cos TT}{\cos TH} \quad (1)$$

여기서

$$\cos TH = \cos L \cos D \cos H + \sin D \sin L \quad (2)$$

$$\cos TT = \cos(L - T) \cos D \cos H + \sin(L - T) \sin D \quad (3)$$

로 表示된다.

平板型 集熱器의 集熱量 Q_u 는 다음式으로 表示된다

$$Q_u = F_R A [H_T (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad (4)$$

이와같이 表示된 集熱量에 대한 太陽熱 集熱器의 性能은 一般的으로 實驗⁽³⁾에 의하여 구하며, 이 實驗에 있어서는 太陽熱 集熱器를 通過하는 熱傳達 媒體의 流量과 集熱器 入出口의 溫度差를 測定한다. 따라서 이 測定值들에 의한 集熱量 式을 다음과 같이 세울 수 있다.

$$Q_u = AGC_f (T_o - T_i) \quad (5)$$

다음에 太陽熱 集熱器의 性能은 集熱效率 η 로 表示되며 다음과 같이 定義된다.

$$\eta = Q_u / AH_T \quad (6)$$

式 (4), (5), (6)에 의하여 太陽熱 集熱器의 效率은 다시 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta &= Q_u / AH_T \\ &= GC_f (T_o - T_i) / H_T \\ &= F_R (\tau\alpha)_n - F_R U_L (T_i - T_a) / H_T \end{aligned} \quad (7)$$

이 式에서 보여 주는 바와같이 太陽熱 集熱器의 效率은 $F_R (\tau\alpha)_n$, $F_R U_L$ 을 常數로 할 경우, $(T_i - T_a) / H_T$ 의 一次函數임을 알 수 있다. Simon⁽³⁾은 이 實驗式을 토대로 여러 種類의 太陽熱 集熱器에 대한 性能實驗結果를 提示하였다.

蓄熱容量이 限定되어 있는 太陽熱 시스템에서는 集

熱器 入口의 熱媒體溫度가 항상 最小可用溫度(T_{min}) 보다 크며, 이는 시스템의 設計 및 作動條件에 따라 좌우된다. 또한 太陽熱 시스템의 長期性能은 構成品の 性能을 考慮하지 않을 수 없다. Klein⁽¹⁰⁾은 F_R 대신에 太陽熱 集熱器와 貯藏탱크사이의 性能低下에 대하여 集熱熱交換 效率修正係數 F_R' 를 導入하여 다음과 같이 나타내었다.

$$F_R'/F_R = \{1 + (F_R U_L / GC_p)(AGC_p / \epsilon_c C_{min} - 1)\}^{-1} \quad (8)$$

液體式 貯藏탱크의 시스템性能은 定常狀態에서 考慮하기로 한다 이 경우에 에너지平衡에 의한 微分方程式은 다음과 같이 表示된다.

$$(MC_p) \frac{dT}{dt} = Q_u + Q_{Aux} - Q_{load} - Q_{loss} \quad (9)$$

여기서 Q_{Aux} , Q_{load} , Q_{loss} 는 각각 供給된 補助에너지, 給湯負荷, 탱크熱損失을 나타낸다.

$$Q_{Aux} = GC_p (T_{set} - T) \quad (10)$$

$$Q_{load} = GC_p (T - T_m) \quad (11)$$

$$Q_{loss} = UA(T - T_{env}) \quad (12)$$

3. 시스템 모델에 대한 시뮬레이션

Fig. 1은 家庭用 給湯시스템에 대한 概略圖이다.

集熱部는 冬節期에 集熱器의 凍破방지를 위해서 不凍液 注入方式의 閉鎖分離 回路로 한다. 또한 一定한

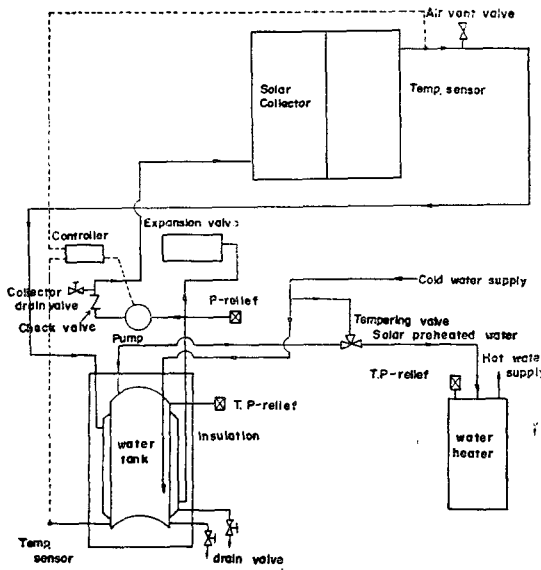


Fig. 1 Flow diagram for Solar domestic hot water system

壓력으로 維持시키기 위하여 膨脹탱크를 設置하고 過壓으로 인한 破損을 방지할 목적으로 air vent 밸브를 最上端部에 設置한다. 集熱部의 기능은 差溫作動裝置로써 集熱器 上端部의 溫度와 貯藏탱크 下端部의 溫度差가 $6^{\circ}C$ 이상 되면 펌프에 電源을 공급시켜 集熱器를 통하여 貯藏탱크로 循環하게 하였다. 또한 림퍼링밸브를 設置하여 항상 一定한 溫度를 維持하게 하였고 여기서 設定溫度는 $55^{\circ}C$ 로 調節하였다. 그리고 貯藏탱크에 부착되어 있는 溫度調節밸브에 의하여 貯藏탱크內의 溫度가 $88^{\circ}C$ 를 초과하지 못하도록 하였다. 또한 太陽熱 給湯시스템의 性能에 중요한 影響을 미치고 있는 集熱面積, 貯藏탱크容量, 集熱器의 設置傾斜角같은 設計因子들을 具體적으로 變化시킴으로서 이에 따른 影響을 分析하였고, 諸元은 Table 1과 같다.

Table 1 Solar DHW system description

Collector	<ul style="list-style-type: none"> * Collector fluid=50% ethylene glycol * Single glazed * Collector area=1.67 3.34 5.01 6.68 8.35 10.02(m²) * $F_R(\tau\alpha)_n=0.679$ * $F_R U_L=4.29(W/m^2^{\circ}C)$
System	<ul style="list-style-type: none"> * Two tank * Collector orientation <li style="padding-left: 20px;">Tilt angle=0° 20° 37.6° 45° 60° <li style="padding-left: 20px;">Azimuth angle=0° * Storage capacity=250, 300, 500(l) * Heat transfer fluid=water
Load	<ul style="list-style-type: none"> * Draw=260 l/day * Delivery temperature=$55^{\circ}C$

시뮬레이션에서 每時間當 發生한 變化를 계산하였고 그것은 다음시간의 시스템變數를 얻기 위해서 使用되었다. 이 解析에서 1年間的 每時間마다의 日射量과 氣溫을 使用하였다. 이 資料를 利用해서 每時間마다 變化하는 水平面日射量을 傾斜面日射量으로 변환시킨다. 이때 水平面日射量이 $126W/m^2$ 미만일 경우 貯藏탱크로 流入되는 熱量은 없고 貯藏탱크 溫度가 $88^{\circ}C$ 이상일 경우도 流入되는 熱量은 없게 하였다. 이에 따른 集熱效率도 계산된다. 여기에 集熱面積을 곱해서 集熱器에 의해서 얻어진 熱量을 구했다. 위와같은 과정이 24번 반복되어 그날의 습을 또한 그달의 습 나아가 그해의 습을 구하였다. 그리고 給水使用量은 各個人의 習慣, 生活水準 및 環境등에 따라 每日時間當

Table 2 Hourly printout after start-up of solar hot water system

PROGRAM TO EVALUATE PERFORMANCE OF SOLAR DOMESTIC HOT WATER SYSTEM

LATITUDE = 37.6 TILT = 37.6
 COLLECTOR AREA = 6.68 SQ.M.
 STORAGE VOLUME = 300.00 LITER

1 1 12 12 -22.92 8.0

HOUR	SH	TA	TS	TSNEW	ST	EFF	SHITT	HWD	HHW	AUX	TOTHT	FSOLAR
1	0	-1.2	8.0	8.0	0.0	0.000	0.	0	0.	0.	0.	0.000
2	0	-2.0	8.0	8.0	0.0	0.000	0.	0	0.	0.	0.	0.000
3	0	-2.7	8.0	8.0	0.0	0.000	0.	0	0.	0.	0.	0.000
4	0	-3.1	8.0	8.0	0.0	0.000	0.	0	0.	0.	0.	0.000
5	0	-3.4	8.0	8.0	0.0	0.000	0.	0	0.	0.	0.	0.000
6	0	-3.8	8.0	8.0	0.0	0.000	0.	0	0.	0.	0.	0.000
7	0	-3.9	8.0	8.0	0.0	0.000	0.	30	0.	1641.	1641.	0.000
8	8	-3.9	8.0	8.0	0.0	0.000	0.	30	0.	1641.	1641.	0.000
9	78	-4.0	8.0	8.0	0.0	0.000	0.	10	0.	547.	547.	0.000
10	197	-1.9	8.0	12.2	421.8	0.521	1468.	10	0.	547.	547.	0.000
11	317	0.2	12.2	18.4	617.9	0.538	2222.	10	49.	498.	547.	0.089
12	408	2.3	18.4	25.8	766.9	0.531	2722.	10	121.	426.	547.	0.222
13	411	3.3	25.8	32.6	772.5	0.496	2561.	10	208.	339.	547.	0.380
14	337	4.4	32.6	37.3	660.8	0.438	1935.	10	287.	261.	547.	0.524
15	222	5.4	37.3	39.4	475.3	0.333	1059.	10	341.	206.	547.	0.624
16	97	4.4	39.4	38.3	0.0	0.000	0.	10	365.	182.	547.	0.668
17	8	3.4	38.3	35.3	0.0	0.000	0.	30	1060.	582.	1641.	0.646
18	0	2.4	35.3	32.6	0.0	0.000	0.	30	954.	688.	1641.	0.581
19	0	1.9	32.6	31.7	0.0	0.000	0.	10	286.	261.	547.	0.523
20	0	1.4	31.7	30.9	0.0	0.000	0.	10	277.	271.	547.	0.505
21	0	0.9	30.9	30.2	0.0	0.000	0.	10	267.	280.	547.	0.489
22	0	0.4	30.2	29.4	0.0	0.000	0.	10	258.	289.	547.	0.472
23	0	0.0	29.4	28.7	0.0	0.000	0.	10	250.	297.	547.	0.457
24	0	-0.5	28.7	28.0	0.0	0.000	0.	10	241.	306.	547.	0.441

MON	DAY	DSHW	DSAUX	DTOT	FSOLAR
1	1	4965.	9261.	14226.	0.349

1 2 13 13 -22.83 7.9

HOUR	SH	TA	TS	TSNEW	ST	EFF	SHITT	HWD	HHW	AUX	TOTHT	FSOLAR
1	0	-1.2	28.0	28.0	0.0	0.000	0.	0	0.	0.	0.	0.000
2	0	-1.2	28.0	28.0	0.0	0.000	0.	0	0.	0.	0.	0.000
3	0	-1.2	28.0	28.0	0.0	0.000	0.	0	0.	0.	0.	0.000
4	0	-1.5	28.0	28.0	0.0	0.000	0.	0	0.	0.	0.	0.000
5	0	-1.8	28.0	28.0	0.0	0.000	0.	0	0.	0.	0.	0.000
6	0	-2.1	28.0	28.0	0.0	0.000	0.	0	0.	0.	0.	0.000
7	0	-2.2	28.0	26.0	0.0	0.000	0.	30	702.	941.	1643.	0.427
8	3	-2.2	26.0	24.2	0.0	0.000	0.	30	632.	1011.	1643.	0.385
9	64	-2.3	24.2	23.7	0.0	0.000	0.	10	190.	358.	548.	0.346
10	178	-0.7	23.7	25.7	379.9	0.346	879.	10	183.	365.	548.	0.335
11	292	0.8	25.7	29.8	567.8	0.434	1645.	10	206.	341.	548.	0.377
12	400	2.4	29.8	35.7	750.2	0.465	2330.	10	254.	293.	548.	0.464
13	378	3.0	35.7	40.5	708.9	0.423	2005.	10	324.	224.	548.	0.591
14	353	3.6	40.5	44.6	686.4	0.391	1791.	10	380.	168.	548.	0.693
15	278	4.2	44.6	47.1	593.4	0.329	1306.	10	427.	121.	548.	0.779

PROGRAM TO EVALUATE PERFORMANCE OF SOLAR DOMESTIC HOT WATER SYSTEM

LATITUDE = 37.6
TILT = 37.6

COLLECTOR AREA = 5.68 SQ.M.
STORAGE VOLUME = 300.00 LITER

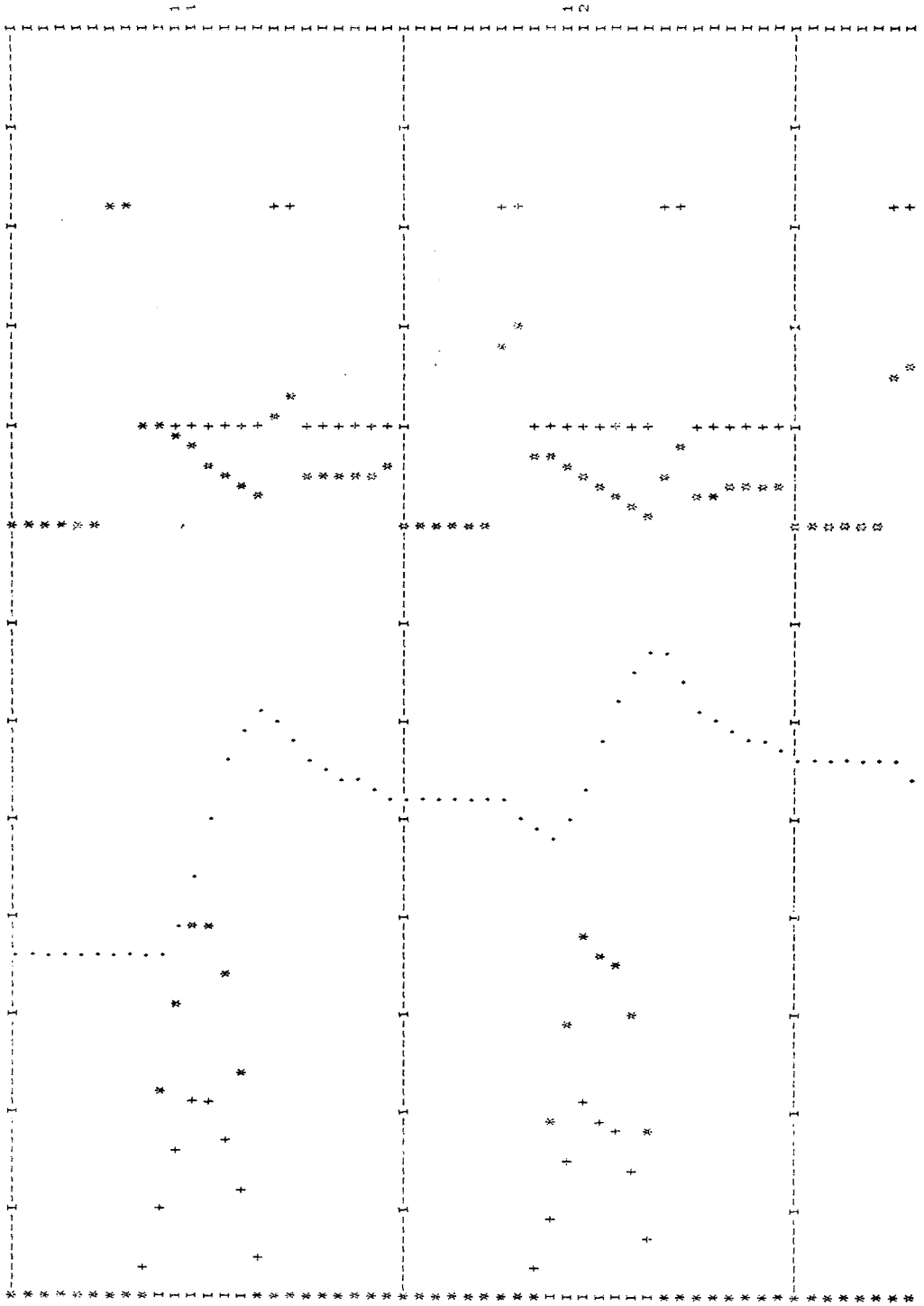


Fig. 2 Computer plot of hourly results

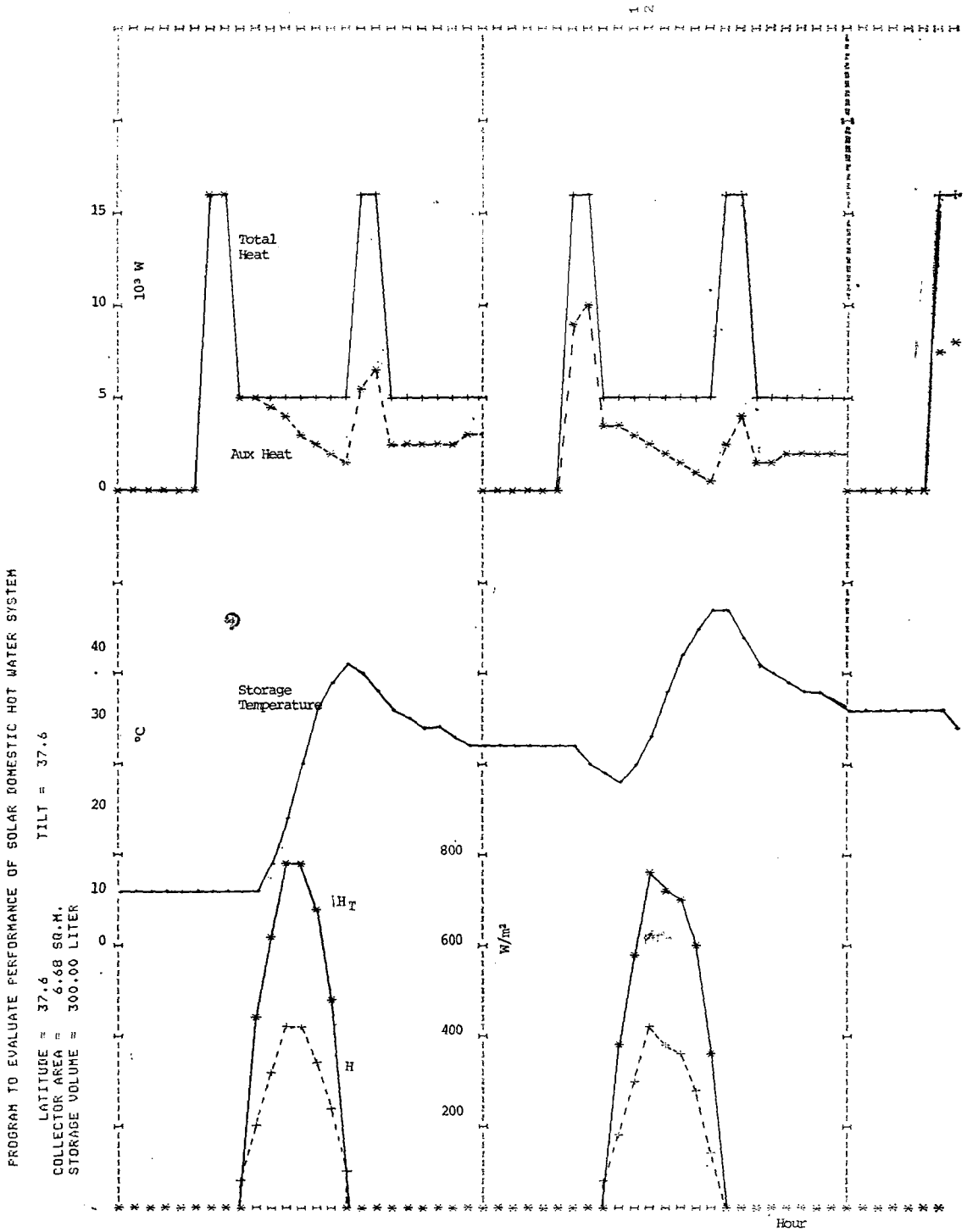


Fig. 3 Computer plots of hourly results with lines drawn between data

不規則하기 때문에 시뮬레이션에 있어서 5人家族을 基準으로 1日當 260l 를 使用하는 것으로 하였다. 本 시뮬레이션 處理는 VAX11/780 을 使用하였다.

4. 結果 및 考察

代表的인 時間當 分析結果는 Table 2 와 같다. Table 2 에서 1年中 特定일 1月 1日 貯藏탱크의 市供給水 溫度는 8°C이며 每 時間마다 變化하는 貯藏탱크溫度, 傾斜面 日射量, 集熱效率, 貯藏탱크로 流入되는 熱量, 給湯使用量, 補助熱量, 總熱量 및 太陽熱 依存率등을 알 수 있다. 그리고 日 마지막에 該날의 合計가 計算 되어졌다. 子正부터 6時까지 시스템에 發生한 變化가 없는데 給湯을 使用하지 않았고 日射量이 없기 때문이다.

Fig. 2는 1月 1日, 2日에 대한 Table 2의 結果 值를 plot 한 것이다. 下端部의 +, *는 水平面, 傾斜面 日射量이고 •는 貯藏탱크의 溫度 그리고 上端部의 +, *는 總熱量, 補助熱량을 각각 표시했다. 總熱量과 補助熱량이 일치되는 경우는 +는 *로 대치되었다. Fig. 3은 各 부호들을 선으로 연결한 것이다.

Fig. 4에서는 集熱器 設置傾斜角을 緯度와 일치시키고 貯藏탱크 容量을 300l로 하고 集熱面積을 3'×6'

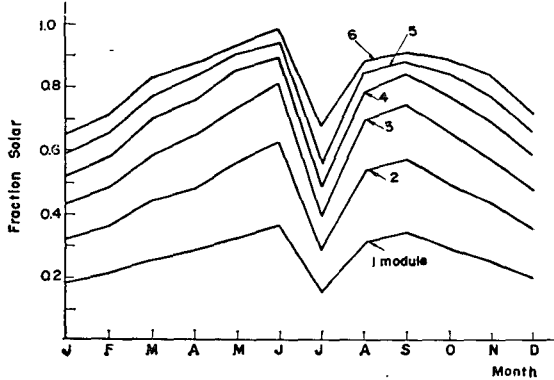


Fig. 4 Fraction of total energy required by a domestic hot water system supplied by solar energy at latitude=tilt=37.6°N for 300 liter tank. One module=1.67 (m²)

(1.67m²)까지 1枚에서 6枚로 變化시킨 結果를 圖示 한 것으로 面積이 增加할수록 시스템性能이 劣化되는 現象을 알 수 있다. 특히 7月에 太陽依存率이 低下되는 이유는 雨期로 인한 日射量의 부족때문인 것으로 판단된다. Fig. 4에 의하면 集熱面積 3'×6' 짜리 4枚가 最良 適當한 것으로 나타났다.

Fig. 5는 貯藏탱크 容量을 250, 300, 500l로 하고 集熱面積을 變化시킨 結果인데 集熱面積이 적은 경우에는 시스템性能이 線型的으로 增加하며 面積이 큰 경우에는 劣化되는 傾向을 알 수 있다. 또한 貯藏탱크의 容量은 性能에 別차이가 없지만 容量이 커질수록 性能이 약간 向上됨을 알 수 있다.

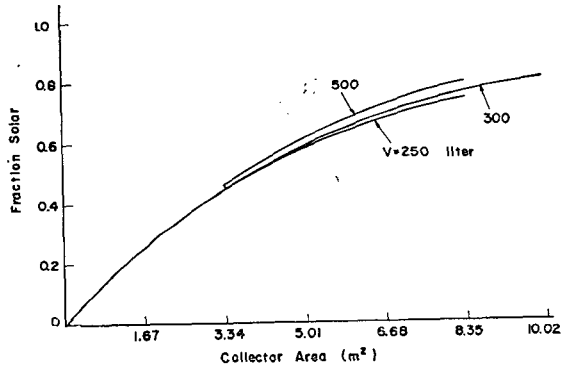


Fig. 5 Fraction of total energy required by a domestic hot water system supplied by solar energy at latitude=tilt=37.6°N

다음은 1日 總 給湯 使用量을 一定하게 하고 每時 時間當 使用量을 Table 3과 같이 變化시켰다.

그 結果는 Table 4와 같다. 여기서 每月 太陽依存 率을 比較해 본 結果 거의 變化가 없는 것으로 나타났 다.

家庭用 給湯시스템의 경우에는 時間當 給湯 使用量이 變化하여도 1日 總 使用量을 一定하게 하면 시스템性能에는 別 차이가 없음을 알 수 있었다.

Table 5는 設置傾斜角을 37.6°, 貯藏탱크 容量은 300l, 集熱面積을 3'×6' 짜리 4枚(6.68m²)로 하였을 경우 1年間の 每月 熱量의 合, 總합과 太陽依存率을

Table 3 Solar DHW hourly usage

unit: liter

Hour	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
#1	0	0	0	0	0	0	30	30	10	10	10	10	10	10	10	10	30	30	10	10	10	10	10	10
#2	0	0	0	0	0	0	40	40	10	10	0	20	10	5	5	10	25	25	20	10	25	5	0	0

나타낸 결과이다. 맨 下端의 Value 란 經濟性을 分析하는 것으로 年間 太陽依存率과 年間 總 熱量의 공급 給湯시스템 總 費用으로 나눈값이다.

Table 4 Monthly performance of solar hot solar hot water systems for different demand cycles illustration for latitude=tilt=37.6°, collector area=6.68m², storage volume=300 liter

Month	Fraction solar	
	Demand cycle #1	Demand cycle #2
Jan.	0.519	0.519
Feb.	0.577	0.578
Mar.	0.700	0.702
Apr.	0.752	0.754
May.	0.843	0.845
Jun.	0.899	0.902
Jul.	0.467	0.468
Aug.	0.780	0.780
Sep.	0.832	0.833
Oct.	0.770	0.772
Nov.	0.687	0.690
Dec.	0.571	0.573

Table 5 Monthly Sums Program to evaluate performance of solar domestic hot water system

Latitude=37.6°		Tilt=37.6°			
Collector area=6.68 m ²					
Storage volume=300.00 l					
Month	Mshw	Maux	Mstot	Fsolar	
1	231349.	214534.	445882.	0.519	
2	230889.	169588.	400477.	0.577	
3	296173.	127190.	423363.	0.700	
4	283736.	93761.	377498.	0.752	
5	297321.	55390.	352712.	0.843	
6	279480.	31468.	310948.	0.899	
7	142233.	162210.	304443.	0.467	
8	239369.	67363.	306731.	0.780	
9	263779.	53152.	316930.	0.832	
10	278103.	83010.	361113.	0.770	
11	264923.	120674.	385596.	0.687	
12	245079.	184355.	429434.	0.571	
Months	Yssh	Ysaux	Ytot	Fsolar	Value
12	3052434.	1362695.	4415128.	0.691	2.16

Fig. 6 은 集熱器 設置傾斜角을 變化시킨 結果이다. 여기서 最適傾斜角은 37.6° 에서 45° 사이로 나타났다. 0°의 경우는 冬節期에 損失이 엄청난 반면 60°에서는 夏節期에 損失이 많은 것으로 나타났다.

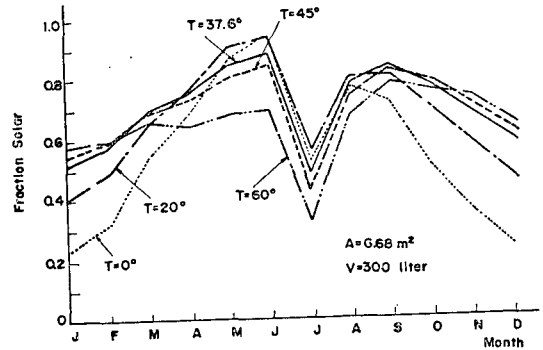


Fig. 6 Effect of tilt angle of Collectors on the performance of domestic hot water system

Fig. 7 은 集熱器 單位面積當 가격을 ₩92,000, 設置 費用을 ₩350,000, 貯藏탱크, 펌프, 제어장치, 배관, 보온재등을 ₩1,500/l로 하였을 경우 經濟性을 分析한 것인데 集熱面積 6.68m², 貯藏탱크 容量 250l가 제일 經濟的임을 알 수 있었다.

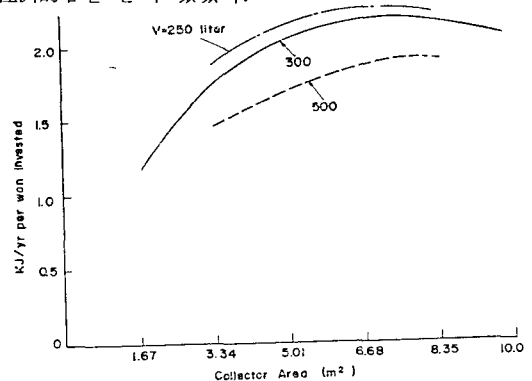


Fig. 7 Value of solar domestic hot water systems in kJ/yr per Won invested

5. 結 論

컴퓨터 시뮬레이션 모델을 통한 太陽熱 給湯시스템의 性能을 解析한 本 研究에서 다음과 같은 結論을 얻었다.

- (1) 太陽熱 給湯을 위한 最適設置角은 南向의 緯度와 같은 傾斜角이어야 한다.
- (2) 太陽熱 給湯시스템의 경우 5인가족을 기준으로

1日, 1人當 52l, 給湯溫度 55°C에 대한 年間 太陽熱依存率을 약 70%정도로 할 경우 經濟性을 고려한 最適의 集熱面積은 6.68m², 貯藏탱크 容量은 300l로 하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

(3) 給湯의 時間別 使用量이 變化하는 경우, 시스템의 性能에 그다지 큰 影響을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

(4) 太陽熱 集熱器 單位面積當 貯藏탱크 容量을 45l로 하는 것이 제일 適當하다.

參 考 文 獻

- (1) A.H. Fanney and S.T. Liu, "Comparison of Experimental and Computer-Predicted Performance for six Solar Domestic Hot Water Systems", ASHRAE Trans., Vol. 86, Part 1, pp. 823~835, 1980
- (2) W.E. Buckles and S.A. Klein, "Analysis of Solar Domestic Hot Water Heaters", Solar Energy, Vol. 25, pp.417~424, 1980
- (3) S.A. Klein, W.A. Beckman and J.A. Duffie, "TRNSYS—A Transient Simulation Program", ASHRAE Trans., Vol. 82, Part 1, pp.623~633, 1976
- (4) S.A. Klein, P.I. Cooper, T.L. Freeman, D.M. Beckman and W.A. Beckman, "A Method of Simulation of Solar Processes and Its Application", Solar Energy, Vol. 17, pp.29~37, 1975
- (5) B.Y.H. Liu and R.C. Jordan, "The Long-Term Average Performance of Flat Plate Solar Energy Collectors", Solar Energy, Vol. 7, pp.53~74, 1963
- (6) S.A. Klein, "Calculation of Monthly Average insolation on tilted Surface", Solar Energy, Vol. 19, pp.325~329, 1977
- (7) S.A. Klein, W.A. Beckman and J.A. Duffie, "Transient Considerations of Flat Plate Solar Collectors", Trans. ASME, pp.109~113, 1974
- (8) ASHRAE Standard 93~77, "Method of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors", ASHRAE, 1978
- (9) J. A. Duffie and W.A. Beckman, "Solar Energy Thermal Processes", John Wiley & Sons Inc., New York, 1974
- (10) J.A. Duffie, W.A. Beckman and S.A. Klein, "Solar Heating Design by the *f*-chart", Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin Madison, John Wiley & Sons Inc., 1977
- (11) J.A. Kreider and F. Kreith, "Principles of Solar Engineering", McGraw-Hill Co., 1978
- (12) C. Dennis Barley and C. Byron Winn, "Optimal Sizing of Solar Collectors by the Method of Relative Areas", Solar Energy, Vol. 21, pp. 279~289, 1978