

## 축열수조를 이용하는 열펌프식 난방의 특성에 관한 연구

A Study on The Characteristics of Heat Pump Heating System Utilizing Heat Storage Tank

김 호 경\*, 이 기 영,\*\*박 문 수,\*\*황 인 수\*\*  
H.K. Kim, G.Y. Lee, M.S.Park, I.S.Hwang

### ABSTRACT

A study of applying solar assisted heat pump heating system to Korean climatic characteristics has been undertaken through computer simulation using TRNSYS (A Transient System Simulation Program). It is insufficient for heating system composed of each of solar and heat pump system to supply heat met with heating load. So SAHP (Solar Assisted Heat Pump) heating systems which combined solar system with heat pump system are analyzed using the standard weather data of Korea. And SAHP heating systems are categorized into the series system in which the solar storage is used as the source for the heat pump, the parallel system in which ambient air is used as the source for the heat pump, and the dual source system in which the storage or ambient is used as the source depending on which source yields the lowest work input. These combined system are better than each of solar and heat pump heating system in view of thermal performance, and parallel system is most effective among these combined systems.

### 기 호 설 명

$A$  : 집열기 면적  
 $COP$  : 열펌프 성능계수 (Coefficient of Performance)  
 $F$  : Thermal Performance Factor (식 7-2)  
 $Fr$  : Overall Collector Heat Removal Efficiency Factor  
 $Q_{aux}$  : 난방을 위한 보조열원 열량  
 $Q_{hf}$  : 열펌프를 통해서 얻은 열량 이득  
 $Q_{hp}$  : 열펌프 출력

$Q_{load}$  : 건물 난방 부하  
 $Q_{solar}$  : 태양열 시스템에 의해 얻어진 열량  
 $Q_{cap}$  : 열펌프의 용량  
 $Q_{abs}$  : 열펌프의 증발부 흡입열량  
 $T_{amb}$  : 외기온도  
 $T_{room}$  : 실내온도  
 $U$  : 총괄 손실 계수(집열기)  
 $UA$  : 총괄 열손실 계수(집)  
 $\tau\alpha$  : Transmittance-Absorption Product  
 $V$  : 축열조 체적  
 $W_{hp}$  : 열펌프에 가해진 입력

\* 전희장, 서울대학 공과대학 기계공학과 교수

\*\* 서울대학교 기계공학과 대학원

## 1. 서 론

우리나라 에너지공급의 가장 큰 특징은 석유의존율이 커서, 그 대부분이 수입에 의존하기 때문에 에너지 가격에 매우 민감하지 않을 수 없다. 최근의 일시적인 유가하락으로 에너지 절약에 대한 관심이 적어진 듯이나 1973년과 1978년의 에너지파동을 겪은 경험이 있어 앞으로 더욱 심각한 에너지파동을 예상해 볼 수 있다. 따라서 우리나라와 같이 에너지원의 대부분을 수입에 의존하는 형편으로는 에너지절약에 대한 연구를 계속하여야 할 것이다. 본 연구에서는 우리나라의 기상조건상 열펌프를 단독으로 난방에 이용하는 데는 에너지효율이 낮아짐을 착안하여 기존의 태양열 시스템과 열펌프의 조합에 의한 시스템에 대한 연구를 하여 에너지의 효율성을 높이고자 한다. 태양열 시스템과 열펌프는 그 각각이 에너지의 소비를 줄일 수 있는 방법이며, 냉·난방·급탕에 필요한 경비를 경감시킬 수 있는 방법이 된다. 그러므로, 이 두 방식의 결합이 에너지를 좀더 효율적으로 이용하는 데 이득이 있는 것이라고 생각된다. 따라서 이 연구의 목적은 기존의 태양열 난방 시스템과 열펌프 시스템에 대해서 몇개의 가능한 태양열-열펌프 복합 시스템의 열적 성능을 비교 분석하는 데 있다.

태양열 집열-축열 시스템은 외기온도보다 더 높은 온도의 에너지를 공급할 수 있기 때문에 열펌프 단독으로 사용할 때보다 열펌프의 COP를 높일 수 있다. 이러한 이유로 태양열 시스템과 열펌프의 조합에 의한 냉·난방 시스템에 대한 연구는 근래에 들어와서 활발하게 진행되고 있다. B.W. Tleimat 와 E. D. Howe (1)는 기존의 전기 난방장치에 태양열 난방 시스템을 부가하였을 경우 에너지절약에 효과가 있음을 보여주었고, J. W. Mac-Arthur (2)는 태양열 복합 시스템의 경제성 분석을 통하여 이 시스템이 에너지효율 측면에서 효과가 있음을 제시하였으며, T. L. Freeman (3) 등은 태양열-열펌프 복합 시스템의

난방-급탕에 대한 성능 시뮬레이션에서 병렬 방식의 성능이 우수하다는 것을 보여주었다. J. V. Anderson (4) 등은 태양열-열펌프 복합 방식중 병렬 방식의 설계방법을 제시하였으며, C. D. Svard (5) 등은 직렬 방식의 설계방법을 연구하였고, M. P. O'Dell (6)은 집열판의 집열매체를 냉매를 이용하는 경우에 대하여 그 결과를 제시하였고, E. A. Kush (7)는 태양열-열펌프 복합방식중에서 직렬 방식의 성능을 실험을 통하여 보여주었으며, 그 밖에 태양열-열펌프 복합방식에 대한 연구로는 경제성 분석에 대한 연구들 (2, 12, 13) 과 다양한 열원 이용에 관한 연구들 (8, 10, 14) 과 집열판의 변화를 통한 성능향상의 연구들 (6, 9, 18) 등 많은 연구가 행해져 왔다.

## 2. 기본이론

### 2-1 축열의 이론

태양열을 이용하여 냉난방을 행하는 경우, 에너지 밀도가 낮고, 또한 Random 하게 쪼이는 일사열에 대해서 냉난방을 행하기 위해 필요한 열과 부하열량에 대한 안정된 열공급을 확보하기 위해서는 축열을 하지 않을 수 없다. 따라서, 축열의 목적은, 에너지 공급측(태양열)과 수요측(건물열부하), 즉 집열장치와 공조장치와의 사이에서 태양열의 희박성, 불확실성, 간헐성을 보충하기 위해 에너지의 축적과 시간의 어긋남을 조정하는 것이라고 할 수 있다.

축열조의 설치장소로는 건물내부의 실내 또는 마루밑이나 옥외의 지상 또는 지중에 매설하는 방법 등이 있으며, 실내의 설치공간의 유무, 손실 열량 및 설비비 등을 고려해서 결정하여야 한다. 본 연구에서는 현열이용을 위해서 축열매체로 물을 사용했다. 물을 이용한 축열수조는 오래전부터 대규모 건축의 냉난방에 널리 사용되었고, 그 연구도 많이 되어 있으며 설계법에 대해서도 많은 연구가 행해져 왔다.

축열수조에는 축열조(과도응답) 동특성, 축

열조의 수(단조식과 다조식), 압력상태(개방형과 밀폐형), 구조재료, 용도에 따라 여러가지의 형식이 있다. 축열조의 입구 온도에 대한 출구 온도의 과도응답에 대해서는 물을 사용한 축열조에 있어서 선형 모델로의 이론 전개 및 시뮬레이션이 행해지며 대규모 건축에서의 공기조화 설비의 축열조로서 충분한 연구가 되어 있다. 현재 일반적으로 태양열 난방, 급탕 시스템의 대상으로서 고려되고 있는 태양의 집이나 저층건물에서는 지금까지의 빌딩과 같이 빌딩의 기초보 사이에 축열수조로 이용될만한 유효공간이 없기 때문에 전용의 축열수조가 필요하게 된다. 따라서, 축열비용은 태양열 이용에 있어서 큰 부담이지만 전용으로 만들기 때문에 사용조건에 알맞게 가장 효율이 좋은 방식으로 할 수 있는 잇점이 있다.

2-2 태양열 난방 시스템

태양열 난방 시스템은 물 또는 공기를 매체로 하여 집열기로 태양열을 집열하여 이 열을 직접 실내 공기의 가열에 사용하는 것으로서, Fig.1의 기본 개념도에서 표시한 것처럼 집열, 축열, 급열의 요소에 보조열원의 조합으로 구성된다. 급열 요소는 종래의 난방 시스템이며 집열요소는 태양열을 집열하는 집열기와 순환계로 된 것이다. 열부하가 발생하는 시간대와 집열이 가능한 시간대는 반드시 일치하는 것이 아니므로, 집열과 급열 요소의 중간에 축열 요소가 필요하게 된다.

보조 열원은 태양열을 얻지 못할 경우에 난방을 하기 위해 필요한 것으로서, 그 조합방

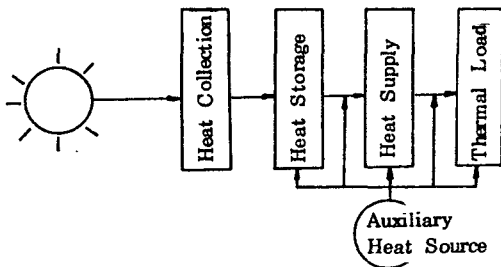
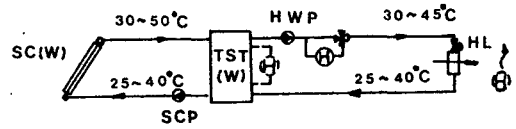
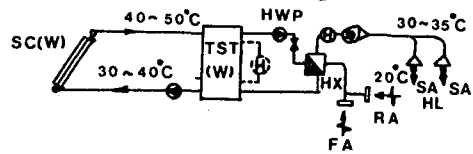


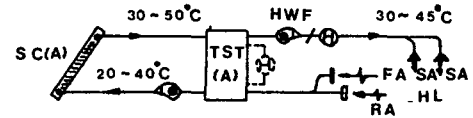
Fig.1 Basic Diagram



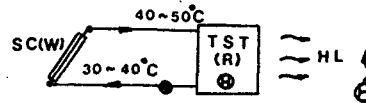
(a) Hot water Heating System with water-collector



(b) Hot air Heating System with water-collector



(c) Hot air Heating System with air-collector



(d) Storage and Radiation System with water-collector

- |                                    |                            |
|------------------------------------|----------------------------|
| SC (W) : Solar Water Collector     | HL : Heat Load             |
| SC (A) : Solar Air Collector       | HX : Heat Exchanger        |
| TST (W) : Storage Tank (Water)     | SCP : Solar Collector Pump |
| TST (A) : Storage Tank (Air)       | SCF : Solar Collector Fan  |
| TST (R) : Storage Tank (Radiation) | HWP : Hot Water Pump       |
| H : Auxiliary Heat                 | HWF : Hot Air Fan          |
| SA : Supply Air                    | FA : Fresh Air             |
| RA : Return Air                    |                            |

Fig.2 Solar Heating System

법에는 여러가지가 있다. 이와 같이 태양열 난방 시스템에서는 종래의 난방 시스템 이외에도 집열, 축열 요소를 설치하게 된다. Fig.2는 태양열 난방 시스템의 기본방식을 나타내며, Fig.2의 (a), (b)는 가장 일반적인 수 집열방식, (c)는 공기 집열방식, (d)는 수 집열 또는 공기 집열로서 축열체가 방열기를 겸하고 있는 특수한 경우이다.

공기집열 방식은 집열기가 수집열 방식보다 약간 싸게 될 가능성이 있고, 동결 누수의 위험이 없는 잇점이 있으나, 수집열 방식보다 순환동력이 크고 축열조, Duct의 Base가 크며, 개설제어가 곤란하고, 집열기의 난방 또는 급



Table 3. Number of Days of Lowest Temperature (< 0°C)

Month Location	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Seoul	31	26	18	2	-	-	-	-	-	1	11	27
Incheon	30	25	16	1	-	-	-	-	-	-	8	25
Suweon	31	26	20	4	-	-	-	-	-	-	12	28
Gwangju	28	23	16	3	-	-	-	-	-	-	8	23
Jeonju	28	24	17	2	-	-	-	-	-	-	8	23
Mokpo	23	19	9	-	-	-	-	-	-	-	2	12
Ulsan	26	21	13	1	-	-	-	-	-	-	6	22
Pusan	20	15	6	-	-	-	-	-	-	-	1	12
Taegu	29	24	15	1	-	-	-	-	-	-	9	26

Table 4. Monthly Mean Temperature.

Month Location	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Seoul	-4.3	-1.6	4.4	11.4	17.4	21.0	24.7	25.7	20.5	14.2	6.7	-0.9
Incheon	-3.7	-1.6	3.9	10.2	15.8	19.7	23.8	25.3	20.5	14.4	7.2	-0.3
Suweon	-4.0	-2.9	3.3	11.1	16.8	20.4	24.4	25.4	19.8	12.6	5.6	-2.0
Jeonju	-1.5	1.2	5.7	12.4	18.0	21.8	26.1	26.7	21.3	14.6	8.2	1.8
Gwangju	-0.7	0.9	6.0	12.4	17.8	21.5	25.6	26.5	21.4	15.0	8.8	2.4
Taegu	-1.5	0.6	6.4	12.4	18.2	21.8	25.9	26.8	20.7	14.6	8.0	1.5
Pusan	1.7	3.2	7.9	12.4	17.2	20.0	24.0	26.1	21.8	16.9	11.2	4.7
Ulsan	0.4	2.2	6.9	11.9	17.1	20.4	24.9	26.2	20.8	15.3	9.4	3.0
Mokpo	1.3	1.9	6.3	12.4	17.0	20.8	25.0	26.7	22.3	16.5	10.4	4.2

Table 5. Minimum Lowest Temperature.

Location	Temperature	Day
Seoul	-23.1	1927. 12. 31
Incheon	-21.0	1931. 1. 11
Suweon	-25.1	1931. 1. 5
Gwangju	-19.4	1943. 1. 5
Jeonju	-17.1	1933. 1. 27
Mokpo	-14.2	1915. 1. 31
Ulsan	-16.7	1936. 1. 27
Pusan	-14.0	1915. 1. 13
Taegu	-20.2	1923. 1. 19

방의 최저기온의 값을 살펴보면 Table 5 와 같다.

이상의 기후 특성을 볼 때 중부지방에서는 태양열 시스템의 난방에의 적용이 가능하나, 평균 외기기온이 매우 낮아 집열열량이 적고 동파의 위험성이 있어 실제로 태양열 시스템을 적용시키는 데는 문제점이 있다. 또한 외기기온이 낮음으로 열펌프의 효율은 떨어지고 소요동력이 상당히 증가하게 되며, 빙점이하에서 운전할 때 서리가 생기는 것이 난점이다. 또한 증발기와 응축기 사이의 온도강하를 작게 유지한다면 대량의 공기를 사용해야 되므로 큰 장치를 사용해야 되고, 소음이 문제로 된다. 그러므로, 기존의 태양열 시스템과 열

펌프식 난방방식의 단독사용보다는 이 두 방식의 결합으로 에너지 효율을 높이는 것이 바람직 하다.

#### 4. 해석방법

태양열-열펌프 복합 방식의 열적 분석은 그 복잡성으로 인하여 시스템의 동적특성을 적절히 결정하는 방법인 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한다. 본 시뮬레이션에서는 여러개의 Modular Subroutines (예로 집열기, 축열조, 열펌프, 난방부하 등)으로 구성되어 있어 각 Subroutine 의 결합으로 시스템의 특성과 작동을 시뮬레이션할 수 있는 TRNSYS(23)로 수행하였다. 계산대상은 동계 4개월 즉, 12월 1일부터 3월 31일까지의 2,904 시간의 동계중이며, 계산가격은 15 분이며, 매간격에 대해선 안정상태로 가정하고 계산을 수행한다.

#### 5. 계산모델

본 시뮬레이션에서 사용되는 계산 모델들은 열펌프, 난방부하(집), 태양열 집열기, 축열조, 펌프, 전체 시스템 제어방식들이며, 이들의 조합으로 각각의 복합시스템을 구성하였다. 또한 계산의 복잡성을 피하기 위하여 표준기상조건이나 균일한 집열판 온도, 균일한 축열조내 온도 등과 같은 가정을 하였으며 각 구성 모델들의 특징은 다음과 같다.

##### 5-1 열 펌 프

열펌프의 크기는 난방부하의 최대 열부하에 맞게 선택되며, 성능은 제작회사의 명세서상에 있는 열펌프 성능데이터(23)를 시뮬레이션의 자료로 이용한다. 열펌프의 성적계수는 응축부에서 얻어지는 열량에 대해 압축기를 구동시키는 데 들어가는 일의 비로 정의되며, 이것은 증발부 온도에 따라 변화한다. 본 연구에서 사용된 열펌프는 준안정상태 (Quasi-Steady State)로 보며, 예로 7C에서의 난방능력은 25,300 kJ/hr 이며, 증발부를 지나 는 유량은 2,500 kg/hr 이다. 열펌프의 구체적인 성능도표는 Fig.3에 도시한 바와 같다.

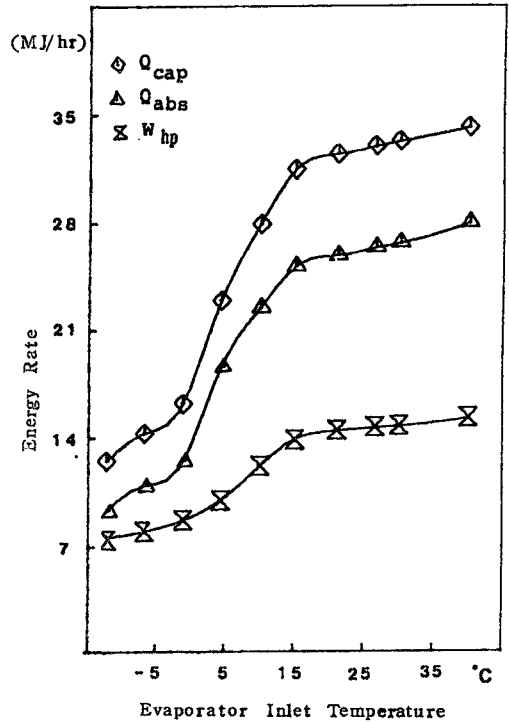


Fig.3 Performance Data Sample For Heat Pump

수열원 열펌프를 사용할 경우에는 증발부에서의 열전달계수가 더 크므로 같은 크기의 공기 열원 열 펌프에 비해 높은 COP를 얻을 수 있으나 넓은 범위의 열원온도에 대하여 효율적으로 운전하기에는 고온일 때의 과부하, 저온일 때의 동결과 같은 어려운 점이 있다.

##### 5-2 난방부하(집)

본 연구에서 사용된 난방부하는 이층 집으로 벽, 바닥, 지붕이 충분히 단열되어 있고, 창문은 표준 이중창으로 되어있으며 바닥면적은 180 m<sup>2</sup> 유효 UA 값은 1,200 kJ/(hr °C) 이다. 실내 온도를 정부에서 추천하는 18~20 °C로 유지하기 위한 동계 4개월 (12~3월)의 난방 부하는 Degree-Hours 법(23)에 의거해서 계산하며 서울의 경우 약 70~75 GJ 이 된다. 부하의 열적특성은 ASHRAE(24)에 의해 제안된 방법을 따랐다.

5-3 태양열 집열기

집열기의 사양은 1m×2m 크기의 집열판을 25매 사용하여 총집열 면적은 50㎡이며 Single Glazed Plate 를 사용하고 남향으로 40℃ 경사지게 설치되었다. 집열판 뒷면은 충분히 단열되었고, 열흡수율은 0.95이며 작동유체는 물이다. 집열판의 투과흡수율적(τ $\alpha$ )과 손실계수(U), 열저거인자(Fr)는 일정한 값을 가지며, Duffie-Beckman (20)에 의해 제안된 모델에 근거하여 계산되어지며 Table 6에 표시하였다. 프로그램에 들어가는 입력 데이터는 시간별 외기온도와 일사량이며 이들 데이터는 김효경(22)의 자료를 인용하였다.

Table 6. Collector Parameter.

Liquid Collector Type	Fr	U (w/m <sup>2</sup> °C)	$\tau_{\infty}$
Single-Glazed	0.90	8.33	0.76

5-4 축열 수조

축열 수조는 건물의 하부에 위치하여 물로 채워진 콘크리트 수조이고, 완전 혼합 모델을 사용한다. 수조의 외벽은 충분히 단열되어 있고 열손실 계수는 1.5 (kJ/hr m<sup>2</sup>°C)의 값을 갖는다. 여기서 축열수조의 열손실이 난방 부하에 영향을 주지 않는다고 가정한다. 축열수조의 크기는 통상의 태양열 시스템에서 추천하는 값인 축열조 용적과 집열판 면적의 비가 0.075 (V/A)을 따랐다.

5-5 보조 열원

태양열 시스템과 열펌프와의 복합 시스템에서 부족되는 에너지를 공급하기 위하여 통상적인 난방 Back up System을 두어 부하에 필요한 열량을 공급토록 하였으며, 용량은 최대 50,000kJ/hr이다.

6. 전체 시스템의 개요

태양열-열펌프의 복합 시스템에 대한 비교, 분석을 위해 통상적인 기본 태양열 시스템과

열펌프 난방 시스템을 정의하고, 복합 시스템의 여러가지 가능성에 대한 보편적 형태인 병렬, 직렬, 이중 열원 방식을 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 시뮬레이션에 사용된 다섯가지의 System Model을 살펴보면 다음과 같다.

6-1 기본 태양열 난방 시스템

기본 태양열 난방 시스템의 개략도는 Fig. 4와 같이 평판형 집열기, 고정된 집열기 회로, 열교환기, 축열수조, 보조열원과 조절 장치로 구성되었으며, 집열판을 흐르는 매체로는 물을 사용한다. 각 요소들에 대한 모델은 5절에서 설명한 바와 같다.

6-2 열펌프 난방 시스템

열펌프 난방 시스템은 2냉동톤의 공기대 공기 열펌프, 공급 덕트, 부족 열량의 공급을 위한 보조 히터로 구성되며 그 개략도는 Fig. 5와 같다.

6-3 병렬 방식

병렬 방식은 본 연구의 태양열-열펌프 복

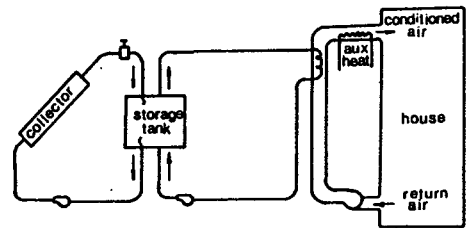


Fig.4 Schematic Diagram of the Solar Energy System

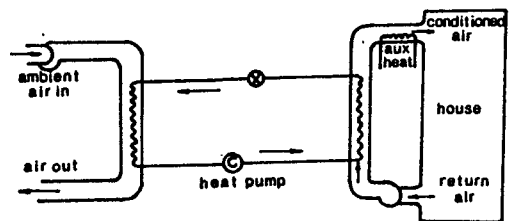


Fig.5 Schematic Diagram of the Heat Pump Heating System

합 시스템 중에서 가장 간단한 구조를 갖는다. 즉, 기본 태양열 시스템에 또하나의 열원으로 열펌프를 병렬로 연결시킨 형태로, Fig. 6 에 그 개략도를 도시하였다. 이 시스템에서는 태양에너지를 난방부하에 가능한한 많이 사용하도록 한다. 열펌프는 방안의 온도가 20 °C 보다 낮은 경우에만 작동하며, 열펌프와 태양에너지로 난방부하를 채우지 못할 경우 보조히터가 작동하도록 되어 있다. 이러한 병렬 시스템의 잇점은 장치의 상대적인 간결성을 들 수 있으며, 열펌프의 열원으로서 태양에너지를 이용하지 못하는 점이 있으나, 복잡한 시스템에 필적할 성능을 갖고 있다.

6-4 직렬 방식

직렬 방식은 열펌프를 태양열 시스템과 난방부하에 직렬로 연결한 비교적 간단한 형태의 태양열-열펌프 복합 방식이다. 이 시스템의 개략도는 Fig.7 에 도시되어 있으며, 증발부는 축열조 탱크나 축열조 탱크 회로 안에 설치하고, 응축부는 부하의 공급덕트 안에 설치한다. 열펌프는 축열조의 설정온도(보통 5 °C) 이상에서 작동하며, 축열조 온도가 부하에 직접 공급할 만큼 높으면, 열펌프의 입력을 줄이기 위해 직접적인 태양열 난방만을 한다. 이 직렬 방식은 집열기 입구 온도를 낮추어 집열효율을 향상시키며, 열펌프의 증발부 열원온도를 높임으로서 열펌프의 성능도 향상되는 잇점이 있다.

6-5 이중 열원 방식

이중 열원 방식에서는 열펌프의 증발부를 축열수조와 외기의 두 곳에 설치한다. 증발부의 열원으로서, 외기와 집열된 태양에너지 중에서 온도가 높은 부분을 택하여 열펌프의 성능을 향상시키는 목적이 있다. Fig.8 에서 보는 바와 같이 이중 열원 방식에는 3 가지의 난방 방식이 있다. 첫째로 축열수조가 설정된 온도보다 높으면 직접적인 태양열 난방이 이루어진다. 이때 열펌프의 작동을 멈추지고 초과되는 집열량은 축열조에 저장된다. 축열수

조 온도가 설정온도보다는 낮고 대기온도보다 높은 경우는 축열 조내의 유체가 열펌프의 증발부로 흐르게되어 열원으로 사용된다. 끝으로 축열수조 온도가 최저온도 이상이고 대기 온도보다는 낮을 경우는, 대기가 열펌프의 증발부 열원으로 쓰이게 되며, 필요한 경우 보조히터가 가동된다. 이러한 방식으로 작동되는 이중 열원 방식은 병렬 방식과 직렬 방식이 갖는 장점을 최대한으로 이용하는 시스템으로 보인다.

7. 태양열-열펌프 복합 방식의 성능

각 시스템에서 평가되는 중요한 파라미터들은 에너지량이다. 또한 여기서 계산하는 시스템은 에너지에 의해 그 성능을 고려하며, 난방을 위한  $Q_{load}$  에는 태양열 시스템에 의해

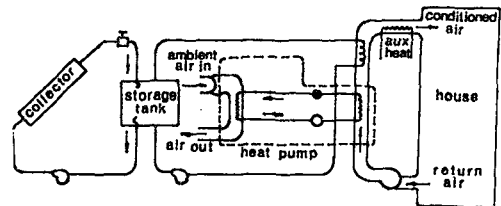


Fig.6 Schematic Diagram of the Parallel Solar Heat Pump System

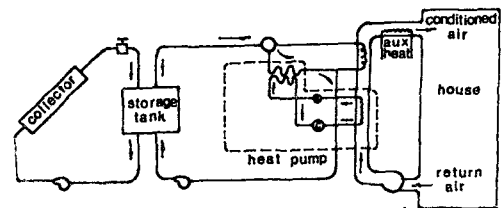


Fig.7 Schematic Diagram of the Series Solar Heat Pump System

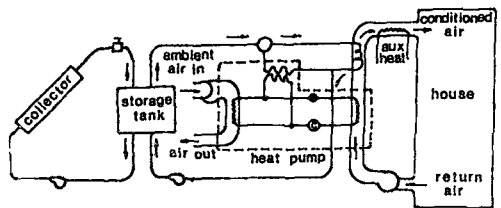


Fig.8 Schematic Diagram of the Dual Source Solar Heat Pump System



얻어지는 열량인  $Q_{solar}$  열펌프를 통해서 얻은 열량인  $Q_{hf}$ , 열펌프의 입력인  $W_{hp}$ 와 난방부하를 맞추기 위한 보조열 원인  $Q_{aux}$ 의 합이 된다. 축열조 내의 에너지량의 손실은 무시하며, 시스템의 에너지 밸런스는 다음과 같다.

$$Q_{solar} + Q_{hf} + W_{hp} + Q_{aux} + Q_{load} \quad (7-1)$$

윗 식에서  $Q_{sol}$ 와  $Q_{hf}$ 는 Free Energy이고,  $W_{hp}$ 와  $Q_{aux}$ 는 Purchased Energy 를 나타낸다. 태양열-열펌프 복합 방식의 열적 성능의 척도는 Free Energy 와 Total Load의 비인 Thermal Performance Factor,  $F$ 로서 다음과 같이 정의된다.

$$F = \frac{(Q_{hf} + Q_{solar})}{Q_{load}} = \frac{(Q_{aux} + W_{hp})}{Q_{load}} \quad (7-2)$$

여기서 보조에너지는 GAS, OIL, 전기, 혹은 이들의 조합으로 공급되는 반면 열펌프의 일은 전기로 한다. 따라서 Thermal Performance Factor,  $F$ 는 단지 필요 에너지만을 반영하고 연료의 가격이나 종류와는 무관하다. 부하에 대하여 태양열 시스템과 열펌프 난방을 모두 사용하지 않는 경우에  $F$ 의 값은 Zero가 된다. 또한  $F$ 는 COP나 집열기 면적에 의존하는 경향이 있으며, 집열기 면적이 증가함에 따라 0부터 1까지 증가한다.

### 8. 결과 및 검토

#### 8-1 열적 성능

본 연구에서 행한 시뮬레이션에 대한 전체적인 에너지 밸런스는 난방 시스템에 공급되는 모든 에너지의 합이 부하측이 요구하는 열량과 같다는 개념으로 고려할 수 있다. 시뮬레이션의 계산결과를 시스템에 대한 Heat Source 즉,  $Q_{solar}$ ,  $Q_{aux}$ ,  $W_{hp}$ ,  $Q_{hf}$  각각의  $Q_{load}$ 에 대한 비율은 그래프로 나타낸 것이 Fig.9이다. 여기서는 동절기 4개월에 대한 각 시스템, 즉 태양열 시스템, 열펌프 시스템, 직렬, 병렬, 이중 열원 태양열-열펌프 복합 방식에 대해서 나타내었다. Fig.9에서  $Q_{sol}$ 와  $Q_{hf}$ 를 합한 값이 Free Energy가 차지하는 비

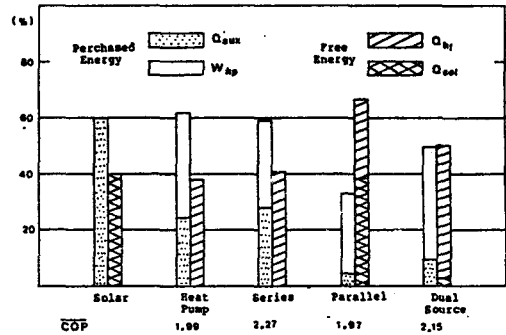


Fig.9 Heating Contribution From All Possible Source For Combined System

율이 되고 이 값이 곧  $F$ 가 된다.  $F$ 값이 크다는 것은 Purchased Energy가 적다는 의미와 같은 것이므로 에너지 효율이 좋아짐을 의미하게 된다. Fig.9에서 보여주는 바와 같이 병렬 복합 방식에서 태양열 난방 시스템에 열펌프를 동시에 사용하게 되면  $F$ 값이 다른 시스템에 비하여 약간 더 큰 값을 갖는 것으로 나타난다. 다시 말하면, 이 병렬 방식이 에너지효율이 좋음을 뜻하는 것이다. 이중 열원 방식에 대한  $F$ 값의 종합적인 효과는 병렬 방식 보다 약간 작은 값으로 나타난다. 그렇지만, 시스템이 복잡하기 때문에 이러한 점에서는 병렬 방식이 유리하다고 생각된다.

#### 8-2 열펌프의 성능 계수

열펌프의 평균 COP는 시스템 마다 다르다. 본 연구에서 사용된 열펌프의 성능 데이터는 간단하게 하기 위하여 공기 대 공기 열펌프의 성능 데이터만을 이용하였다. 이 공기열원 펌프는 그 COP가 외기온이  $0 \sim 7^{\circ}C$ 에서 1.5 ~ 2.5 정도이다. 태양열을 이용한 축열조를 열원으로 사용하는 직렬 방식이나, 외기와 축열조의 물중에서 높은 온도의 것을 열원으로 이용하는 이중 열원 방식에서는 집열에 의하여 덩어린 물을 열원으로 이용하므로 그 평균 COP는 외기만을 열펌프의 열원으로 이용하는 방식보다 크게된다. 그런데, 직렬과 이중 열원 두 방식에 대해 열펌프의 성능 데이터로서 공기 대 공기 열펌프 성능 데이터를 사용

하여, 이들 두 방식의 전체적인 성능에 영향을 미칠 것이 예상되나, T. L. Freeman (3)과 F. M. Hatheway (13) 등의 연구를 참조하면 태양열-열펌프 복합시스템의 전체 난방기간에 대한 성능에는 상기한 열펌프의 COP의 영향이 그다지 크지 않은 것으로 보여 주고 있다. 본 연구의 결과는 병렬 방식이 직렬과 이중열원 방식에 비해 열펌프의 평균 COP는 약간 적은 데도 불구하고, 난방기간 전체에 대해서는 더 좋은 효율(F)을 갖는다고 결과가 나타났다. 이는 낮에 축열된 온수를 난방에 이용하면서 병렬 방식에서는 펌프동력만이 필요한데 반하여, 직렬이나 이중열원 방식에서는 축열된 열을 난방에 이용할 때 열펌프 입력을 필요로 하기 때문이라고 볼 수 있다. 즉, 이들 두 시스템은 축열된 열을 난방에 이용할 때 열펌프 입력을 가해주어야만 하는 이종의 에너지 전달과정이 존재하기 때문에 이와 같은 결과가 얻어졌다고 보여진다. 병렬 방식에 대하여 12, 1, 2, 3월의 임의의 날짜에 대하여

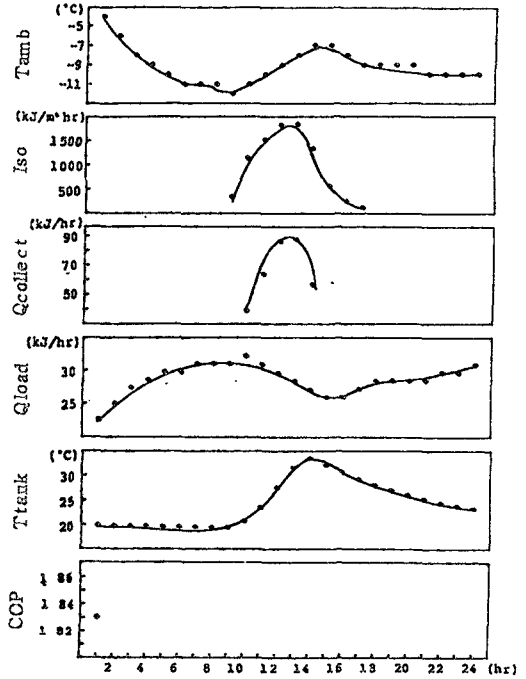


Fig.11 Dynamic System Response For A Typical Day (Jan. 12)

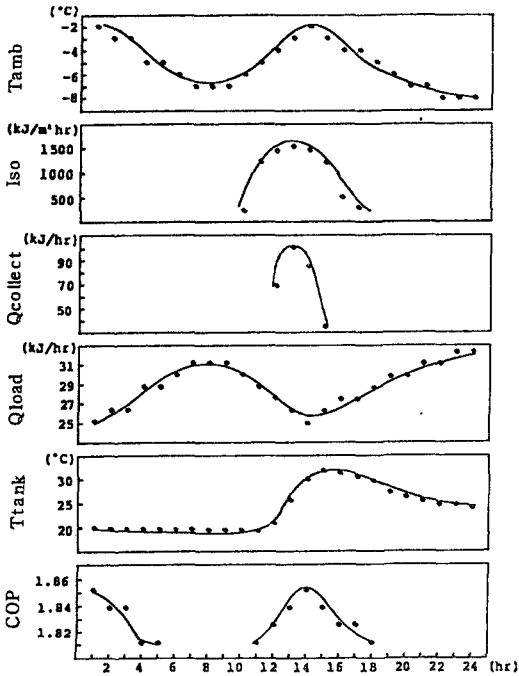


Fig.10 Dynamic System Response For A Typical Day (Dec. 24)

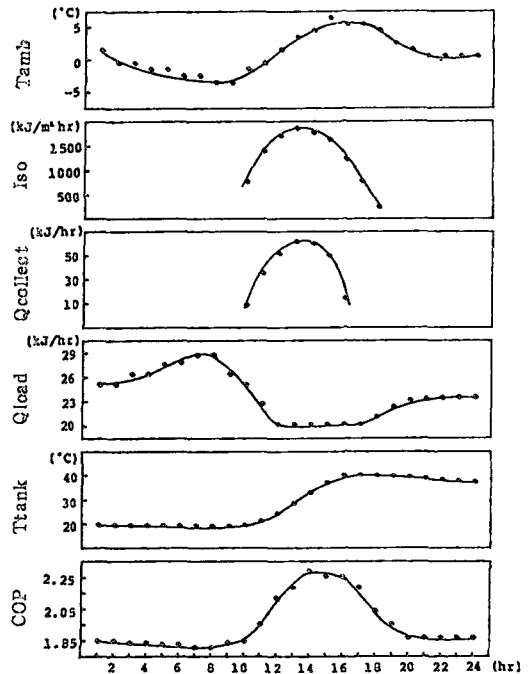


Fig.12 Dynamic System Response For A Typical Day (Feb. 19)

외기온도, 일사량, 집열량, 열펌프의 성능계수를 나타낸 것이 Fig.10, Fig.11, Fig.12, Fig.13이다. 여기에서 공기 열원 열펌프의 작동조건은 외기온도가  $-5^{\circ}\text{C}$  이상에서만 작동되도록 하였다. 이러한 작동조건을 근거로서 시뮬레이션에 이용된 열펌프의 성능을 외기온도가  $0^{\circ}\text{C}$  이하일 때에 대하여 시간당 건물난방부하, 열펌프 출력, 보조 열량 등의 변화에 대해 Fig.14의 그래프로서 나타낸다. 외기온도가 떨어짐에 따라서 난방부하는 증가하는 데 비하여 열펌프의 출력은 감소하므로 보조열량이 증가하게 된다. 이 두 곡선은 약  $-5^{\circ}\text{C}$  부근에서 교차함을 보여준다.

8-3 축열수조의 크기에 대한 집열면적의 비(Ratio)의 변화에 따른 영향

축열수조의 크기에 대한 집열면적의 비에 대한 병렬 방식의 성능에 대한 영향은 Fig. 15와 같다. 여기에서는 집열면적은  $50\text{ m}^2$ 으로 고정시키고 축열수조의 크기를 증가시켜 가면

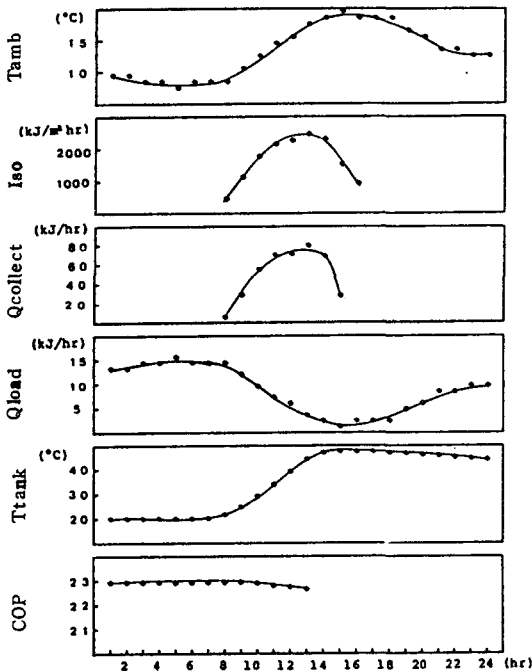


Fig.13 Dynamic System Response For A Typical Day (Mar. 21)

서 전체부하에 대한 Free Energy와 Purchased Energy의 비율의 변화를 나타내 보았다. Free Energy가 차지하는 비율이 클수록, 다시말하면, Purchased Energy가 차지하는 비율이 작을 수록 그 성능이 좋아진다고 볼 수 있는데, 그림에서도 알 수 있듯이 축열수조의 체적이 증가될수록 시스템의 성능이

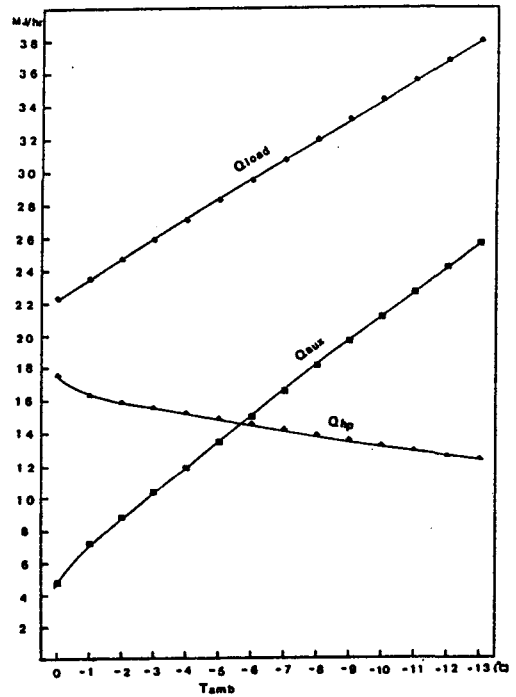


Fig.14 Heat Pump Operating Characteristics below  $0^{\circ}\text{C}$

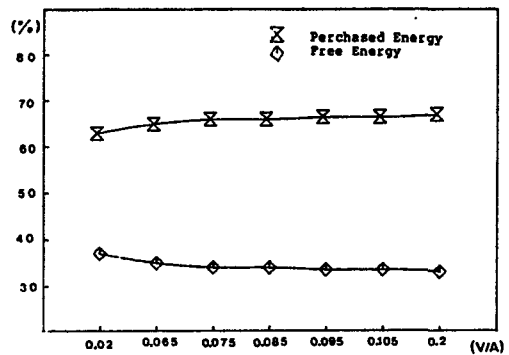


Fig.15 Percent Of Heat Load Supplied By Solar System For Various Tank Size (Collector Area =  $50\text{ m}^2$ )

약간씩 좋아짐을 보게 된다. 그러나, 그 향상되는 폭이 매우 적어 축열수조의 체적의 증가에 비해 에너지 향상이 그렇게 많이 되지는 못한다. 일반적으로 축열수조의 크기가 작게 되면 사용가능한 태양열을 모두 저장할 수 없게 되고, 크기가 너무 커지게 되면 이용할 수 있는 태양열의 전체량은 증가하는 반면에 직접 난방에 이용하는 데는 낮은 온도가 될 수 있고, 축열 조의 코스트가 비싸지게 되는 불이익이 생기게 된다. 따라서, 축열수조의 크기가 집열면적에 비하여 너무 작아 태양열을 충분히 집열시키지 못할 정도가 아닌 범위내에서 부하에 맞춰서 적당한 체적으로 하는 것이 경제적이라고 보여진다. 표준적인 태양열 시스템에 대해서는 축열수조의 체적에 대한 집열면적의 비( $V/A$ )를  $0.075(m^3/m^2)$ 으로 추천(3)하고 있어, 본 연구에서도 이것을 이용하였다.

8-4 기후의 영향

우리나라의 기후특성은 3절에서도 밝힌 바와 같이 좁은 지형임에도 불구하고, 남북간·동서간에 많은 차이를 보인다. 그런데, 현재의 기상자료의 여건상, 난방 기간동안 비교적 큰 기온차이를 보여주고 있는 김효경이 연구한 표준기상자료중에서 서울과 광주의 시간별 기상 데이터를 이용하여, 병렬 방식에 대하여 계산 결과를 비교해 보았다. Table 7에 병렬 방식에 대하여 이들 두 도시의 난방 부하, 열펌프 구동 입력, 보조열량에 대해 표시해 놓았다. 서울지방의 1월의 난방 부하가

Table 7. Parallel System Heating Performance and Purchased Energy Requirement for January.

	Heating Load	Heat pump Electrical Input	Auxiliary Heat Requirement
Seoul	20.39	4.582	9.366
Gwangju	17.98	6.661	6.932

20.39 GJ인데 비하여 광주지방은 17.98 GJ로 서울지방이 10%정도 난방부하가 많고 전체부하에 대한 Free Energy의 비,  $F$ 값은 서울이 0.61인데 비하여 광주는 0.694로 남쪽지방 즉, 추운 지방일 수록 태양열 복합 시스템의 에너지 효율이 낮다는 것을 보여준다.

9. 결 론

컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 태양열 난방 시스템이 한국의 기후(특히 서울을 중심으로) 특성에의 적용 가능성을 동적열부하 계산용 표준 기상 데이터 TRANSYS (Transient System Simulation Program)를 이용하여 검토하고, 그 효율성을 높이는 방안으로 태양열-열펌프 복합 시스템을 구성하여 계산한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

a) 태양열 난방 시스템 및 열펌프 만의 단독의 방식으로는 서울의 기후 특성상 충분한 에너지를 공급할 수 없다. 이것을 태양열 시스템의 열적 성능을 나타내는 전체 난방부하에 대한 Free Energy의 비(Thermal Performance Factor),  $F$ 값으로 살펴보면, 태양열 난방 시스템의 경우 0.4이고, 열펌프 난방의 경우 0.38로서 전체난방부하에 비하여 적은 값이다.

b) 태양열 시스템과 열펌프 시스템을 복합한 경우에는 열적 성능의 향상을 가져오게 되며, 각각의 복합 시스템 중에서 병렬 방식의 성능이  $F = 0.667$ 로서 우수하다고 나타난다. (Fig.9 참조)

c) 복합시스템에서 축열조의 크기와 집열면적의 비( $V/A$ )가 증가할 수록  $F$ 값이 증가하나 축열조 체적증가분에 비하면  $F$ 의 증가는 적다.

후 기

이 연구는 1986년도 문교부 학술연구조성비에 의하여 수행된 것으로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. B.W. Tleimat and E.D. Howe, "A Solar-Assisted Heat Pump System for Heating and Cooling Residences", *Solar Energy*, pp. 45-54, 1978.
2. J.W. MacArthur, "Performance Analysis and Cost Optimization of A Solar-Assisted Heat Pump System", *Solar Energy*, pp. 1-9, 1978.
3. T.L. Freeman, J.W. Mitchell and T.E. Audit, "Performance of Combined Solar-Heat Pump Systems", *Solar Energy*, pp. 125-135, 1979.
4. J.V. Anderson, J.W. Mitchell and W.A. Beckman, "Design Method for Parallel Solar-Heat Pump Systems", *Solar Energy*, pp. 155-163, 1980.
5. C.D. Svard, J.W. Mitchell and W.A. Beckman, "Design Procedure and Application of Solar-Assisted Series Heat Pump Systems", *J. of Solar Energy Engineering*, pp. 135-143, 1981.
6. M.P.O'Dell, J.W. Mitchell and W.A. Beckman, "Design Method and Performance of Heat Pumps with Refrigerant-Filled Solar Collectors, *J. of Solar Energy Engineering*, pp. 159-164, 1984.
7. E.A. Kush, "Performance of Heat Pumps at Elevated Evaporating Temperatures-with Application to Solar Input," *J. of Solar Energy Engineering*, pp. 203-210, 1980.
8. T.R. Galloway, "Solar-Assisted Heat Pump and Swimming Pool Synergy for Domestic Heating", *J. of Solar Energy Engineering*, pp. 105-111, 1981.
9. S.K. Chaturvedi, Y.F. Chiang and A.S. Roberts, Jr., "Analysis of Two Phase flow Solar Collectors with Application to Heat Pumps", *J. of Solar Energy Engineering*, pp. 358-365, 1982.
10. P.D. Metz, "The Use of Ground-Coupled Tanks in Solar-Assisted Heat Pump Systems", *J. of Solar Energy Engineering*, pp. 366-372, 1982.
11. M. Ucar and S. Mittur, "Weather Sensitivity Analysis of Solar-Assisted Heat Pump Systems", *J. of Solar Energy Engineering*, pp. 182-186, 1984.
12. J.G. Cottingham, "Heat Pump Design; Cost-Effectiveness in the Collection, Storage, and Distribution of Solar Energy", *ASHRAE J.*, pp. 35-38, 1979.
13. Frank M. Hatheway and Albin O. Converse, "Economic Comparison of Solar-Assisted Heat Pumps", *Solar Energy*, pp. 561-569, 1981.
14. Syed A. Shah, Ted H. Short and R. Peter Fynn, "Solar Pond Assisted Heat Pump for Greenhouses", *Solar Energy*, pp. 491-496, 1981.
15. M. Chandrashekar, N.T. Le, H.F. Sullivan and K.G.T. Hollands, "A Comparative Study of Solar Assisted Heat Pump Systems for Canadian Locations", *Solar Energy* pp. 217-226, 1982.
16. R.G. Morgan, "Solar Assisted Heat Pump", *Solar Energy*, pp. 129-135, 1982.
17. S. Kugle, S. Green, A. Haji-Sheikh and D.T.S. Lou, "Performance of Solar Assisted Heat Pump Systems in Residential Applications", *Solar Energy*, pp. 169-179, 1984.
18. S.K. Chaturvedi and J.Y. Shen, "Thermal Performance of A Direct Expansion Solar-Assisted Heat Pump", *Solar Energy*, pp. 155-162, 1984.
19. H.J. Sauer and Jr. R.H. Howell, "Heat Pump Systems", 1983.
20. J.A. Duffie and W.A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes", 1980.

21. 김효경, “공기조화”, 동명사, 1984.
22. 김효경, “동적 열부하 계산용 표준기상 데이터에 관한 연구”, 한국과학 재단 연구 보고서, 1987.
23. TRNSYS, a transient system simulation program, Solar Energy Lab. Rep. No. 38 University of Wisconsin-Madison, 1981.
24. ASHRAE, Handbook of Fundamentals, 1977.
25. 일본 태양에너지 학회편, “태양에너지의 기초와 응용”, 1978.