

# 태양열 축열조가 없는 변유량 제어 방식의 지역난방용 태양열시스템 실증시험연구

백남춘\*, 신우철\*\*, 이진국\*\*\*, 윤응상\*\*\*\*, 윤석만\*\*\*\*\*

\*한국에너지기술연구원(baek@kier.re.kr), \*\*대전대학교 건축공학과.(shinuc@dju.ac.kr),  
\*\*\*한국에너지기술연구원(jklee@kier.re.kr), \*\*\*\*한국에너지기술연구원(yoon@kier.re.kr),  
\*\*\*\*\*한국지역난방공사.(smyoon@hdhc.co.kr)

## The Development of the Climatic Design Tool for Energy Efficient Building Design

Baek, Nam-Choon\*, Shin, U-Chul\*\*, Lee, Jin-Kook\*\*\*, Yoon, Eung-Sang\*\*\*\*, Yoon, Suk-man\*\*\*\*\*

\*Korea Institute of Energy Research(baek@kier.re.kr), \*\*Dept. of Architecture Eng., Daejeon Univ.(shinuc@dju.ac.kr), \*\*\*Korea Institute of Energy Research(jklee@kier.re.kr), \*\*\*\*Korea Institute of Energy Research(yoon@kier.re.kr), Korea District Heating Co.(smyoon@hdhc.co.kr)

### Abstract

In this study, the design of the solar heating system for district heating as well as its operating characteristics and the performance analysis was carried out. This solar district heating system was composed of two different types of solar collector circuit, flat plate and vacuum tube solar collector, in a system. This system supply constant temperature of hot water without solar buffer tank. For this, the proportional(variable flow rate) control was used. The experimental facility for this study was used the Bundang district solar heating system which was installed in the end of 2006. The operating characteristics and behaviour of each collector circuits are investigated especially for the system design and control. The yearly solar thermal efficiency is 47.5% on the basis of aperture area and 39.8% on the basis of gross area of collector. As a result this solar heating system without solar buffer tank and with proportional controller was testified a very effective and simplified system for district heating. It varied especially depend on the weather condition like as solar radiation and ambient temperature.

Keywords : 태양열 지역난방 시스템(Solar district heating system), 평판형 집열기(Flat plate solar collector), 진공관형 집열기(Evacuated solar collector), 실증시험(Demonstration)

## 기 호 설 명

$T_{p,o}$	: 평판형 집열기 출구온도
$T_{rdhw}$	: 지역난방수 환수온도
$\Delta T_{p,on}$	: 평판형 집열펌프 ON되는 온도차
$\Delta T_{p,off}$	: 평판형 집열펌프 OFF되는 온도차
$T_{e,o}$	: 진공관형 집열기 출구온도
$T_{e,on}$	: 진공관형 집열펌프 ON 설정온도
$T_{e,off}$	: 진공관형 집열펌프 OFF 설정온도
$\Delta t$	: time delay
$T_{HX2,o}$	: 진공관형 집열열교환기 2차측 출구온도
$T_{RET}$	: 전동밸브 V2 제어 설정기준온도
$T_{dhw,set}$	: 태양열 승온 설정온도
$F_R$	: 집열열교환 효율계수
$U_L$	: 집열기 열손실 계수 (Kcal/hr.m <sup>2</sup> .°C)
$\tau$	: 투과율
$\alpha$	: 흡수율

## 1. 서 론

지역난방지역에 태양열 적용은 지금까지 태양열시스템이 적용되어오던 단일 건물 및 적용분야와는 달리 다양한 형태의 열부하로 인해 일 년 내내 상당히 많은 양의 부하가 지속적으로 발생하고 있고, 게다가 지역난방수(district heating water : 이하 DHW) 열 공급망을 통해 광범위한 지역으로 열을 공급하고 있어 태양열 적용도 광범위한 지역에 분산 설치가 가능하다. 또한 태양열시스템 규모를 아무리 크게 한다 하더라도 태양열의 존율이 낮기 때문에 태양열의존율 증가에 따른 시스템 효율 저하도 없으며, 태양열시스템이 지역난방시스템과 더불어 24시간 관리되기 때문에 사후관리상의 문제가 없는 등 태양열시스템 적용처로서 여러 가지 장점이 있다. 그러나 DHW 공급온도가 100°C 이상으로 비교적 높다는 단점도 있다.

따라서 최근 들어 유럽을 중심으로 지역난

방에 태양열을 적용하려는 노력이 급증하고 있다. 유럽에서 보급된 대표적 시스템은 덴마크의 마스탈 지역 외 다수, 독일의 Neckasulum 외 다수, 오스트리아의 린츠 솔라시티 등이다. 이들 시스템은 기존의 지역난방시스템에 추가로 태양열을 설치해서 연계한 것도 있고, 일부는 신규단지를 조성하면서 일련의 중앙난방 개념으로 설치된 시스템도 있다. 이들 시스템은 전부 지하에 매설된 다양한 형태의 대규모 용량의 계간축열조를 가지고 있다.

본 연구에서는 국내에서는 처음으로 분당의 지역난방시스템에 시범 적용된 지역난방용 태양열시스템의 모니터링 결과를 중심으로 성능을 분석하였다

## 2. 시스템 개요

### 2.1 시스템 개요

태양열시스템은 그림 1과 같이 평판형 집열부와 진공관형 집열부가 집열열교환기(이하 열교환기)에 의해서 각각 분리되어 있으며, 기존의 태양열시스템에서 필수적인 축열조가 없는 것이 특징이다. 이 태양열시스템은 DHW 환수를 일정온도까지 가열하여 공급배관에 넣어주도록 되어있다. 따라서 열교환기 2차측(저온측) 열매체인 DHW 환수는 이들 열교환기를 순차적으로 통과하면서 승온되어 설정온도로 가열되어 DHW 공급관으로 들어간다. 즉 환수되는 DHW는 1차로 평판형 집열기에 의해서 승온된 후 진공관형 열교환기로 들어가서 설정온도로 승온되어 DHW 공급관으로 유입된다. 일사조건과 외기온에 관계없이 태양열시스템이 작동될 때 열교환기를 통과하면서 DHW가 항상 설정온도로 가열되도록 하기 위해서 펌프의 회전수 제어에 의해서 집열매체 및 DHW 유량이 제어되는 변유량 제어 기법이 개발 도입되었다. 집열량을 최대로 하기 위해서 최소 유량하에서도 설정온도 이하이면서 집열이 될 경우에는 열교환기를 통해

나오는 DHW는 다시 환수관으로 들어가도록 구성하였다. 이것은 전동밸브에 의해서 제어된다. 이렇게 하게 된 주된 원인 중에 하나는 DHW 환수배관과 공급배관의 압력차가 일정하지 않으면서 공급관측의 압력이 상당히 높아서 열교환기로 공급되는 펌프가 작동되지 않아도 차압에 의해서 일정량 이상(차압에 의해서 변함)이 공급되기 때문이다.

시스템에 대한 구체적인 사양은 표 1과 같다.

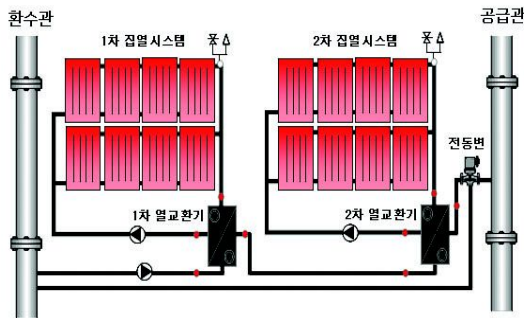


그림 1. 태양열시스템과 지역난방시스템 연계도

## 2.2 제어 및 모니터링용 센서 설치도

태양열 시스템 제어 및 모니터링에 필요한 센서 설치도는 그림 2와 같다. 각각의 집열부 입구 및 출구에 열전대를 설치하였고, 각각의 집열회로에 유량계, 열교환기를 통과하는 2차측 DHW 측정용 유량계, 그리고 집열면에 일사량계를 설치하였다. 집열부의 각각의 array 출구에 온도센서를 설치하였다. 이 온도센서는 각각의 array별 유량 분배를 보기 위한 것이다. 집열면적이 크고 고온으로 작동되는 태양열시스템에서는 집열부의 유량 분배가 상당히 중요하기 때문이다. 특히 변유량 제어방식의 경우에는 유량이 적을 때 일부 집열부로 열매체가 흐를 수도 있어서 유량이 적은 집열부에서 과열이 발생할 수 있기 때문이다.

그림 3은 모니터링 화면을 나타낸 것이다.

표 1. 태양열시스템 제원

item	specification	
Collector loop circuit	close loop	
Collector area	Flat plate	430m <sup>2</sup> (total area)
	vacuum tube	637m <sup>2</sup> (total area)
collector efficiency	flat plate	$F_R(\tau\alpha) = 0.79$ $F_R U_L = 4.94 \text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
	vacuum tube	$F_R(\tau\alpha) = 0.65$ $F_R U_L = 1.5 \text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
Collector tilt angle and azimuth	36.5° south	
Heat exchanger	Type	Plate type which is designed for variable flow rate
	Surface area	HX-1 : 17.9m <sup>2</sup> HX-2 : 60.3m <sup>2</sup>
Collector fluid	30% Propylene glycol	
Pump Capacity	P1	3.7 kW
	P2	3.7 kW
	P3	2.2 kW

## 2.3 시스템 제어

태양열시스템 제어는 펌프의 ON/OFF와 회전수를 제어해서 열교환기를 통과하는 DHW의 온도가 설정온도가 되도록 유량을 제어하는 변유량 정온제어방식이다. 이 제어에서 펌프의 ON/OFF는 P1은 집열기 출구온도( $T_{p,o}$ )와 DHW 환수온도( $T_{rdhw}$ )와의 차온(temperature difference), P2는  $T_{e,o}$ 에 의해 제어되는 차온제어 방식이며, 펌프의 회전수 제어는 각 집열부의 출구온도  $T_{p,o}$ 와  $T_{e,o}$ 에 의해서 제어된다. 즉 “차온제어와 변유량 제어”가 혼합된 방식이다. 이 제어에서 펌프의 RPM 제어는 PDI 제어 방식을 사용하였다. 펌프의 RPM은 일사량 강도가 가장 큰 변수이며, 강도가 클수록 RPM이 증가하게 된다. DHW 회로의 압력은 열교환기로 들어가는 환수배관 측의 압력이 항상 높으면서 계절별로 변하기 때문에 펌프 P3가 작동되지 않더라도

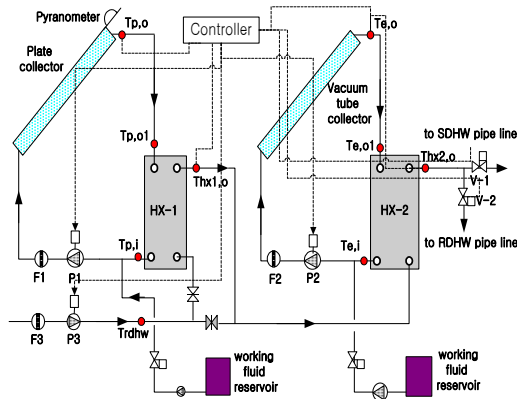


그림 2. 태양열시스템 구성 및 계측장치

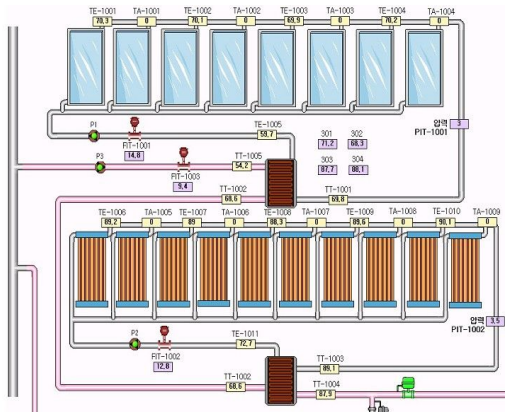


그림 3. 태양열시스템 모니터링 화면

전동밸브 V1이나 V2 중 하나만이라도 개 발되어 있으면 어느 정도의 유량이 흐른다. 따라서 이러한 요인 때문에 최저유량하에서 온도가 설정온도보다 낮을 때 환수배관으로도 들어가도록 한 것이다. 제어에 사용된 구체적인 수치는 다음과 같다.

1) 펌프 제어

① 평판형 열매체 순환펌프(P1)

- ON 조건 :  $T_{p,o} - T_{rdhw} \geq \Delta T_{p,on}$  (약 10°C 내외)
- OFF 조건 :  $T_{p,o} - T_{rdhw} < \Delta T_{p,off}$  (≃ 4°C)

② 진공관형 열매체 순환펌프(P2)

- ON 조건 :  $T_{e,o} \geq T_{e,on}$  (≃ 84°C)
- OFF 조건 :  $T_{e,o} < T_{e,off}$  (≃ 65°C)

③ 지역난방수 순환펌프(P3)

- ON 조건 : P1 또는 P2가 On 된 후  $\Delta t$  (≃ 2분) 시간 경과 후
- OFF 조건 :  $T_{HX2,o} < T_{RET}$  (≃ 79°C) (차압에 의해 유량 순환)
- ON 조건 :  $T_{HX2,o} > T_{dhw,set}$  (≃ 85°C)

④ 전동밸브 V2

- OPEN 조건 :
  - 펌프 P1 or P2 가 ON되면 2분 후에 OPEN
  - 펌프 P1 or P2 가 ON 상태이고  $T_{HX2,o} < T_{RET}$  이하이면 밸브 OPEN
- CLOSE 조건
  - 펌프 P1 and P2 가 모두 OFF 시
  - $T_{HX2,o} > T_{dhw,set}$  이면 밸브 CLOSE

⑤ 밸브 V1

- OPEN 조건 :
  - P3 가 ON 될 때 ( $T_{HX2,o} > T_{dhw,set}$  이 상 될 때)
- CLOSE 조건 :
  - P3가 OFF 될 때 ( $T_{HX2,o} < T_{RET}$  일 때)
  - 펌프 P1, P2가 모두 OFF 될 때

⑥ 유량 제어 : PDI 제어

㉠ P1 에 의한 유량제어 :  $T_{p,o} = T_{rdhw} + \Delta T_p$  가 되도록 유량 조정 (여기서  $\Delta T_p$ 는 평판형 집열부에서 승온되어야 할 온도로서 계절에 따라 약간 조정되어야 하며 12°C 전후 임)

㉡ P2에 의한 유량제어 :  $T_{e,o}$ 가  $T_{dhw,set} + \Delta T_e$  가 되도록 유량을 제어,  $\Delta T_e$ 는 열교환기 효율을 감안해서 결정되는 값임

㉢ P3 유량제어 :  $T_{HX2,o} = T_{dhw,set}$  가 되도록 유량 조절.

### 3. 측정결과 및 분석

#### 3.1 집열기 Array별 유량 분배

태양열 집열기 면적이 커지면 집열부의 유량 분배가 대단히 중요하다. 특히 유량 변동이 큰 변유량제어방식에서 집열기 출구온도가 높은 경우 더욱 그렇다. 일부 집열기 array로 유량이 적게 흐르게 되면 그 부위에서 집열효율이 저하될 뿐만 아니라 과열(비등)이 발생되어 집열부의 급격한 작동압력 상승은 물론이고 열매체의 순환이 곤란해져서 중대한 문제를 발생시키는 요인이 될 수가 있다.

본 시스템은 태양열로 비교적 높은 온도인 90℃ 내외로 난방수를 승온시켜 주는 시스템이기 때문에 태양열 집열부의 작동온도는 이보다 더 높다. 게다가 본 시스템의 경우 변유량 방식을 사용하고 있기 때문에 특히 유량 분배가 어려운 저유량 상태에서 유량분배는 대단히 중요하다.

그림 4 및 5는 1일동안 평관형과 진공관형 집열부 각각의 array 별 출구온도를 나타낸 그림이다. 집열부 각 Array 별 출구온도차는 승온온도폭에 비해 비교적 크지 않음을 알 수 있다. 이것은 유량분배가 어느정도 균일하게 되고 있다는 것을 의미한다. 일부 array에 유량이 상대적으로 적게 흐르게 될 경우에는 상대적으로 그 array 출구온도가 다른 array에서보다 높아지게 된다. 따라서 본 시스템에서는 비교적 유량 분배가 잘되고 있다고 볼 수 있다.

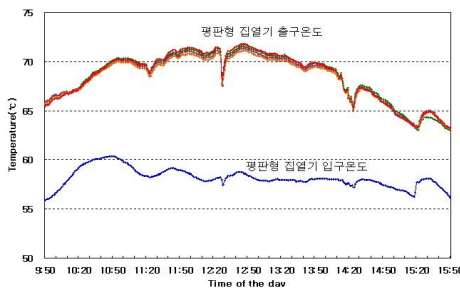


그림 4. 평관형 집열부 입구온도 및 array 별 출구온도

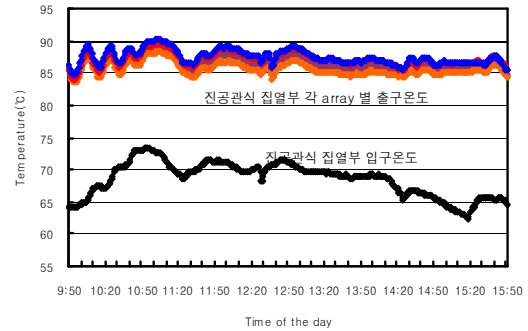


그림 5. 진공관형 집열부 입구 및 array 별 출구온도

#### 3.2 집열면 일사량과 집열량 관계

여러 가지 이유로 인해 측정데이터 상에 문제가 있어 집열량을 알 수 없는 날은 그림 6과 그림 7과 같이 월별로 일 단위면적당 집열면 일사량 대비 집열량과의 관계를 구해서(추세선) 집열량을 계산하였다. 이것은 태양열 집열기의 집열효율( $\eta$ )이 집열면 일사량  $I_t$ 와 집열온도와 외기온과의 차  $\Delta T$ 의 함수이기 때문에 측정상에 문제가 있었던 날은 이 월별 추세선을 활용해서 일사량 값만으로 집열량에 대한 계산이 가능하다.

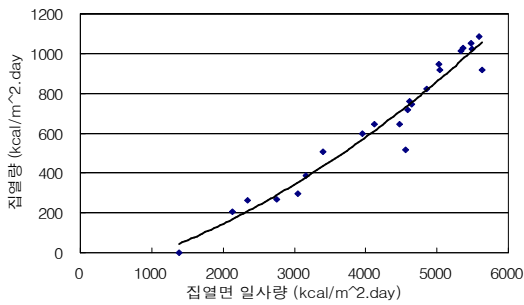
$$\eta = f(I_t, \Delta T) \quad (1)$$

이 그림으로부터 진공관 집열시스템과 평관형 집열시스템의 집열면 일사량 증가에 따른 단위면적당 집열량 증가율은 일사량이 적을 때 차이가 크음을 알 수 있다. 즉 평관형은 일사량이 적을 때 증가율이 낮다. 따라서 진공관에 비해 사용이 비효율적이라는 것을 알 수 있다.

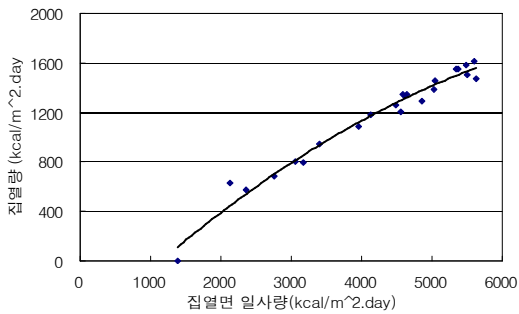
#### 3.3 집열량 및 집열효율

2007년 4월부터 시스템을 가동하였다. 그 중에서 실증시험 상에 문제가 있는 2007년 5월과 6월을 제외한 측정결과를 그림 8과 9에 나타내었다.

월별로 20.3 ~ 46.5Gcal 정도를 태양열로 공급한 것으로 나타났으며, 11개월 동안 총 388.7Gcal 정도를 집열한 것으로 나타났다. 측정기간 동안의 집열면 단위면적당 일사량은 2753kcal/m<sup>2</sup>.day 정도로 우리나라 평균 수평면 일사량 평균치(3000kcal/m<sup>2</sup>.day)에도 크게 못 미치는 것으로 나타났다. 본 태양열 시스템의 연평균 효율은 유효 집열면적 기준으로 약 47.5%, 전면적 기준으로 39.8%로 나타났다.

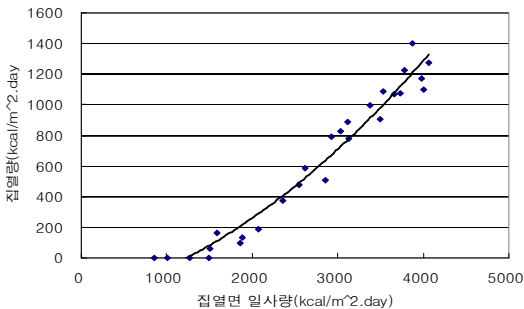


A) 평판형 집열부

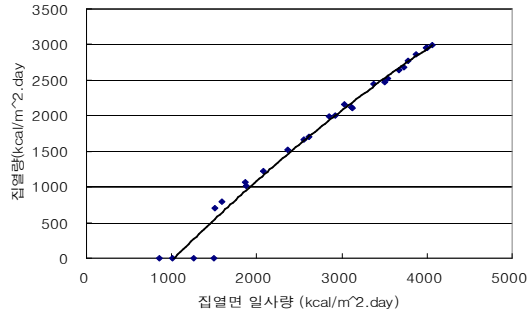


B) 진공관 집열부

그림 6. 집열면 일사량과 집열량 관계('07년4월)



A) 평판형 집열부



B) 진공관형 집열부

그림 7. 집열면 일사량과 집열량 관계('08년 1월)

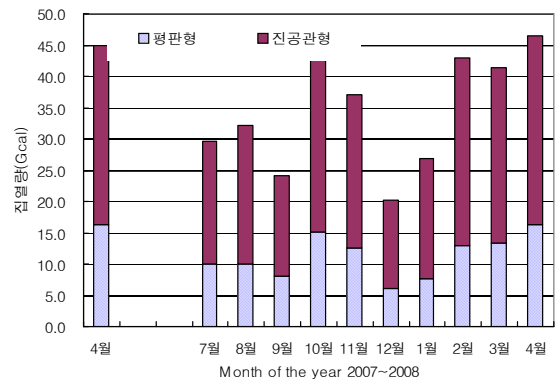


그림 8. 월별 각 집열부별 집열량

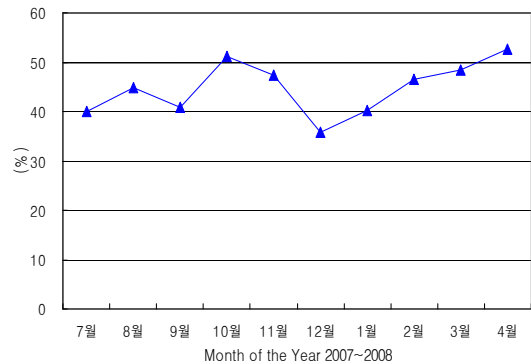


그림 9. 월별 태양열 시스템 효율

#### 4. 결 론

본 연구에서는 국내외적으로 처음 시도 된 태양열 축열조가 없고, 평판형 집열기와 진

공관형 집열부가 한 시스템으로 구성되어 있으면서 태양열 집열기에서 원하는 온도를 직접 생산하는 변유량 제어방식의 지역난방용 태양열 시스템에 대한 1년 동안의 성능시험 결과를 분석하였다. 이 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 시스템은 본당의 지역난방에 적용되어 의도했던바와 같이 작동되었으며, 결론적으로 기존의 태양열시스템을 크게 단순화 시킬 수가 있었다.
- (2) 본 시스템의 변유량 제어방식은 기존의 정유량 제어방식에 비해 집열매체 순환유량을 최소 1/3 이하로 줄 일수 있어 펌프의 소비전력이 크게 줄어들므로 태양열시스템 운전비용 크게 줄어들 것으로 예상된다.
- (3) 승온온도폭이 큰 분야에 적정 작동영역이 다른 2가지 이상의 집열기를 사용하여 효율적인 승온이 가능하였다.
- (4) 변유량 방식의 태양열시스템에서 저유량시 우려되었던 집열부 array별 순환유량 차도 거의 없었던 것으로 나타났다.
- (5) 11개월 동안 태양열시스템으로부터 지역난방에 공급된 총 태양열량은 약 388.7Gcal로 나타났으며, 평균 태양열시스템 효율은 유효 집열면적 기준은 약47.5%, 전면적 기준으로는 39.8%로 나타났다.

### 참 고 문 헌

1. “대규모 태양열 지역난방 및 급탕시스템 개발 및 적용연구”, 백남춘 외, 2007. 5.
2. “태양열시스템 최적화와 신뢰성 향상을 위한 설계 및 성능기준 개발과 실증시험연구”, 백남춘 외, 2002. 12
3. 신우철, 백남춘, “설비형 태양열시스템 설계분석 프로그램 개발”, 한국태양에너지학회논문집, 23권4호, pp. 11-20, 2003.
4. TRNSYS 14.2 Reference manual, University of Wisconsin -Maidison, 1996.