

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 4, 2007

## 지역난방 적용 태양열시스템의 장기 열성능 분석

백남춘\*, 신우철\*\*

\*에너지기술연구원(baek@kier.re.kr), \*\*대전대학교 건축공학과(shinuc@dju.ac.kr)

### Analysis of Long-term Thermal Performance of Solar Thermal System Connected to District Heating System

Baek, Nam-Choon\*, Shin, U-Cheul\*\*

\*Korea Institute of Energy Korea Institute of Energy Research(baek@kier.re.kr),

\*\*Dept. of Architectural Engineering, Daejeon University(shinuc@dju.ac.kr)

#### Abstract

This study analyzed by simulation using TRNSYS as well as by experiment on the solar district heating system installed for the first time for the district heating system in Bundang. Simulation analysis using TRNSYS focused on the thermal behavior and long-term thermal efficiency of solar system. Experiment carried out for the reliability of simulation system. This solar system where the circuits of two different collectors, flat plate and vacuum tube collector, are connected in series by a collector heat exchanger, and the collection characteristics of each circuit varies. Therefore, these differences must be considered for the system's control. This system uses variable flow rate control in order to obtain always setting temperature of hot water by solar system. Specifically, this is a system that heats returning district heating water (DHW) at approximately 60°C using a solar collector without a storage tank, up to the setting temperature of approximately 85~95°C To realize this, a flat plate collector and a vacuum tube collector are used as separate collector loops. The first heating is performed by a flat plate collector loop and the second by a vacuum tube collector loop. In a gross collector area basis, the mean system efficiency, for 4 years, of a flat plate collector is 33.4% and a vacuum tube collector is 41.2%. The yearly total collection energy is 2,342GJ and yearly collection energy per unit area (m<sup>2</sup>) is 1.92GJ and 2.37GJ respectively for the flat plate vacuum tube collector. This result is very important on the share of each collector area in this type of solar district heating system.

**Keywords** : 태양열 시스템(Solar thermal system), 지역난방시스템(District heating system), 차온제어(On-off control), 비례제어(Proportional control)

접수일자 : 2007년 11월 11일, 심사완료일자:2007년 12월 6일

교신저자 : 신우철(shinuc@dju.ac.kr)

## 1. 서 론

지역난방시스템에 적용되는 태양열시스템은 기존의 태양열 급탕 및 난방시스템에 비해 작동온도가 높으며 이에 따른 열효율 저하 및 시스템 제어가 어려운 단점은 있으나 시스템 대형화에 따른 유지·보수가 용이하고 단위면적당 설치비용이 상대적으로 저렴한 장점을 가지고 있다. 또한 지역난방은 연중 상당히 많은 양의 열부하가 지속적으로 있기 때문에 계절적으로 거의 일정한 작동조건을 갖게 되며 시스템 규모 변화에 따른 열성능 차이가 거의 없게 된다. 따라서 적절한 제어기법의 개발 및 적용으로 시스템을 복잡하고 열손실을 증가시키는 태양열 축열조를 배제시킬 수가 있어 이에 따른 시스템 단순화, 운전비 감소 등을 꾀할 수가 있다. 그러나 국내에 보급된 태양열 시스템의 대부분은 중·소규모로서 이러한 장점이 있는 지역난방용 태양열시스템에 대한 시스템 설계는 물론이고 경제성 검토를 위한 열성능 자료조차 거의 없는 상태이다.

본 연구에서는 최근에 한국지역난방공사 분당지사의 지역난방시스템에 적용된 평판형과 진공관 집열기가 조합된 태양열 축열조가 없는 태양열 시스템의 열적거동 및 장기 열성능 분석을 통하여 일한 시스템 설계에 기본이 될 수 있는 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 태양열 시스템 구성 및 제어

그림 1은 한국지역난방공사 분당지사에 적용된 태양열 시스템의 개념도를 나타낸 것이다. 이 시스템은 환수되는 지역난방수 일부를 태양열로 공급온도에 근접한 온도로 가열하여 지역난방수 공급배관에 직접 넣어주는 방식이다. 시스템 초기가동 및 정지는 on-off 차온제어방식에 의해 제어된다. 이 시스템은 축열조가 없기 때문에 시스템이 일단 가동되면 직접 태양열 집열기에 의해서 여기

를 통과하는 지역난방수가 항상 설정온도(지역난방수 공급온도에 근접한 온도)로 가열되게 하기 위해 본 시스템을 위해 특별히 개발된 변유량 비례제어방식을 사용하고 있다.

집열부 구성은 경제성을 고려하여 저온영역에서 경제적인 평판형 집열기(1차 집열시스템)와 고온영역에서 효과적인 진공관형 집열기(2차 집열시스템)로 분리하고 각각의 집열 열교환기를 직렬로 연결하였다. 이 시스템은 기존의 태양열 난방 및 급탕시스템과는 달리 일사량이 있는 주간시간대에 열부하가 집열량 보다도 월등히 크고 태양열 집열 열교환기를 통과하면서 직접 설정온도로 승온되기 때문에 축열조가 필요 없게 된다. 그림 2는 기계실의 지붕면에 설치된 집열기의 배열을 보여주고 있다. 참고로 전면이 평판형집열기이고, 후면이 진공관형 집열기이다.

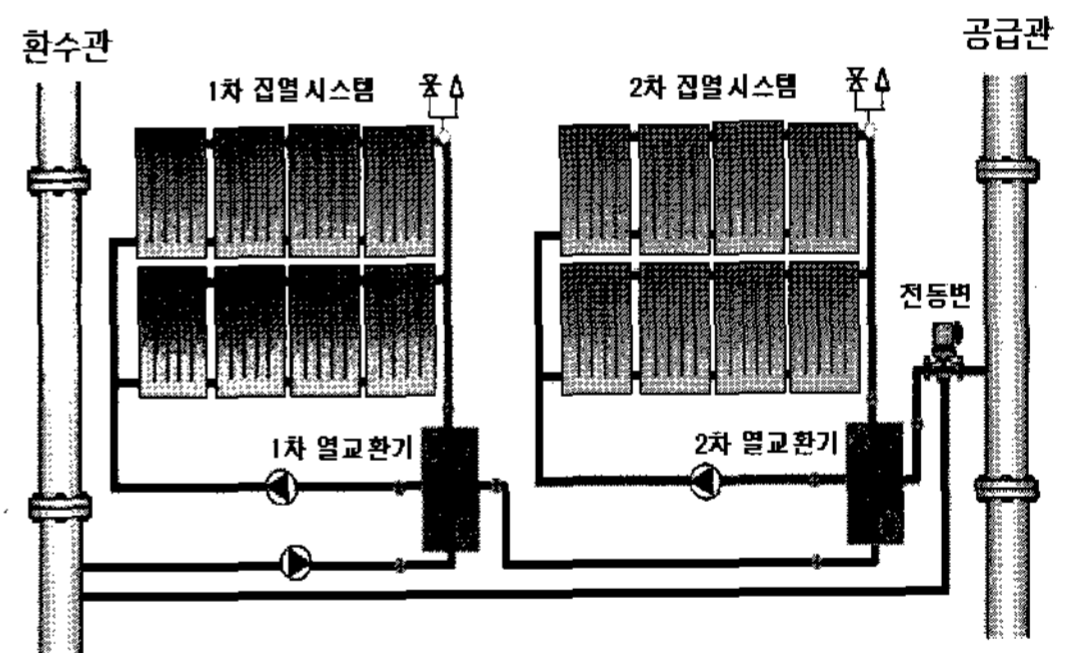


그림 1. 태양열 시스템의 개념도

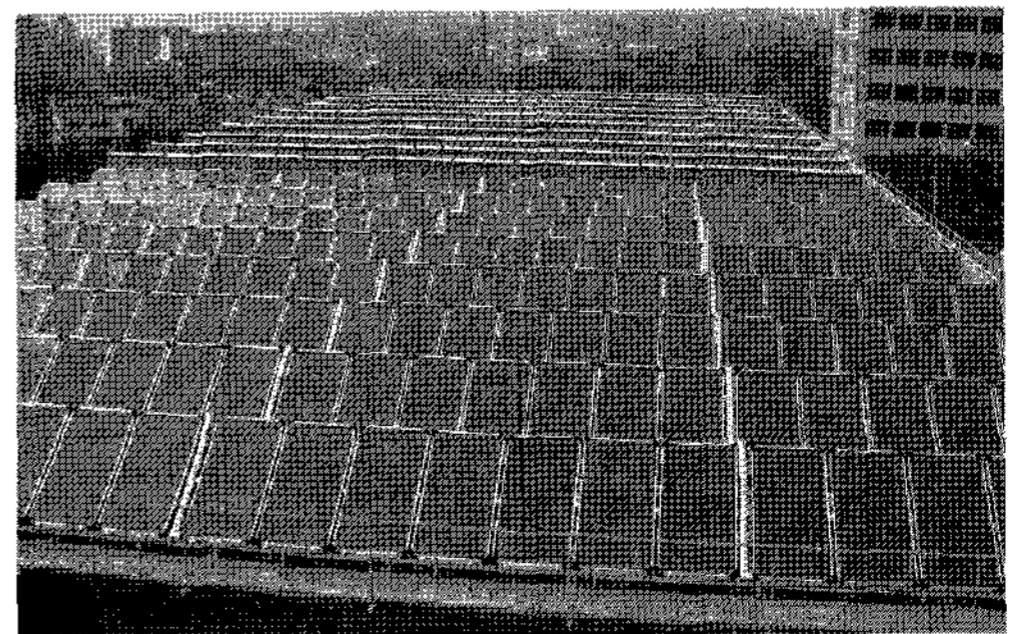


그림 2. 집열기 배열 및 전경

전술한 바와 같이 태양열시스템을 통과하는 지역 난방수 환수는 일차로 평판형 집열기 열교환기를 통해 승온하고, 2차로 진공관형 집열기 열교환기를 통해서 설정온도( $T_{set}$ )까지 가열된다. 어떠한 조건하에서도 펌프가 작동되는 조건하에서는 일사량의 많고 적음에 관계없이, 외기온이 높고 낮음에 관계없이 태양열시스템을 통과하는 지역난방수는 설정온도로 가열되어 공급배관으로 들어간다. 이를 위해서 태양열시스템을 통과하는 지역난방수와 집열매체의 유량은 펌프의 RPM 제어에 의해 제어되는 정온 비례제어방식을 사용하고 있다.

### 3. 이론해석

태양열시스템의 열성능은 시스템의 종류나 구성방법은 물론이고 부하분포와 크기, 기후특성 등에 따라 크게 변한다. 따라서 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 시스템 분석은 다양한 엔지니어링 데이터 및 기상자료를 기반으로 비정상 상태의 열전달해석이 요구된다. 본 연구에서는 모듈구조를 갖는 상용 프로그램으로서 다양한 에너지 시스템의 동적 열전달해석에 사용되고 있는 TRNSYS(A Transient System Simulation Program)를 이용하여 시스템 성능 및 열적거동을 분석하였다. 시뮬레이션 시스템 구성과정에서 정온 비례제어를 위한 모듈은 TRNSYS에서 제공되지 않는 컴포넌트로서, 본 연구에서 새로 개발된 "비례제어기(proportional controller), Type 310을 사용하였다.

시뮬레이션을 위한 열매체 순환 펌프, 열교환기 사양과 집열기 성능 및 설치사양을 정리하면 각각 표 1과 표 2와 같다. 여기서 열매체 순환펌프의 유량 및 열교환기의 효율은 현장 측정자료를 사용하였으며, 집열기의 열성능은 에너지관리공단 해당 집열기 인증성적서에 명시된 값을 사용하였다.

표 1. 열매체 순환펌프 및 열교환기 사양

항 목		사 양
난방수 공급유량	최대	12,500 liter/h
	최소	5,500 liter/h
평판형 집열기 순환유량	최대	15,000 liter/h
	최소	8,500 liter/h
진공관형 집열기 순환유량	최대	11,000 liter/h
	최소	7,600 liter/h
열교환기 효율 (일정효율)	평판형 집열기	82%
	진공관형 집열기	90%

표 2. 집열기의 열성능 및 설치사양

구 분		사 양
집열면적	평판형 집열기	432m <sup>2</sup> (403.9m <sup>2</sup> )*
	진공관형 집열기	637.5m <sup>2</sup> (437.5m <sup>2</sup> )
평판형 집열기	$F_R(\pi)$	0.7929 (0.8481)
	$F_R U_L$	18.6329kJ/m <sup>2</sup> h <sup>°</sup> C (19.9282kJ/m <sup>2</sup> h <sup>°</sup> C)
진공관형 집열기	$F_R(\pi)$	0.5350 (0.7295)
	$F_R U_L$	2.5934kJ/m <sup>2</sup> h <sup>°</sup> C (3.5366kcal/m <sup>2</sup> h <sup>°</sup> C)
설치각도		0.0°
방위각		37.5°

\* ( )은 투과면적 기준

한편 이론해석의 타당성 검토는 본 시스템의 모니터링 장치를 통해서 수집된 측정 결과와 비교하는 것으로 하였다. 그림 3은 모니터링화면을 나타낸 것이다. 각종 센서 및 계측기로부터 출력되는 아날로그 신호는 데이터 로거를 통해 컴퓨터에 저장되며 인터넷을 통해 원격지로 전송된다. 원격 모니터링 화면에는 집열기 각 배열의 출구온도, 열교환기 입·출구 온도, 태양열시스템을 통과하는 지역 난방수 환수 및 공급온도, 외기온도 및 유량, 펌프의 가동/정지 상태, 각 배관내의 압력 등을 실시간으로 확인할 수 있으며, 데이터의 저장은 기본적으로 1분 간격으로 설정하였다.

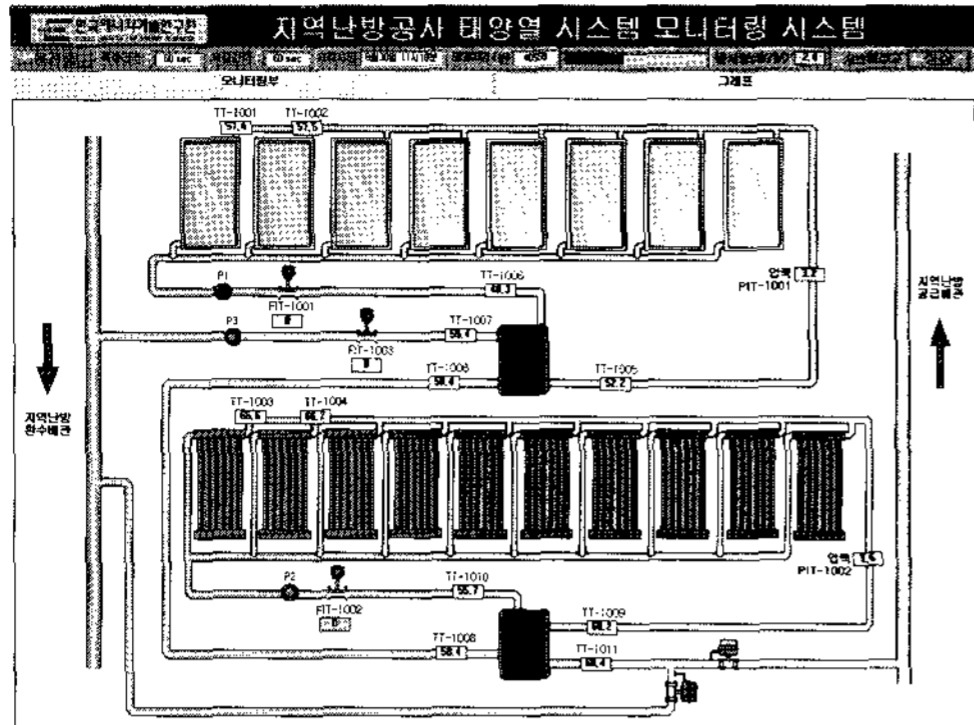


그림 3. 태양열시스템 모니터링 화면

본 연구의 타당성 검토는 2007년 4월 4일부터 5월 10일 사이의 측정 자료를 이용하였다. 이 측정기간동안 태양열시스템에 의해 가열되는 지역난방수 설정온도( $T_{set}$ )는  $85^{\circ}\text{C}$ 로 하였다.

그림 4는 평판형 집열기와 진공관형 집열기의 투과면적기준 일별 시스템 효율을 비교한 것이다. 평판형 집열기의 경우 4월 8일과 4월 10일을 제외하고 이론해석과 실측에 따른 일별 시스템 효율은 5% 미만의 오차를 나타내고 있으며 이 기간의 평균 시스템 효율은 각각 38.5%와 37.5%로서

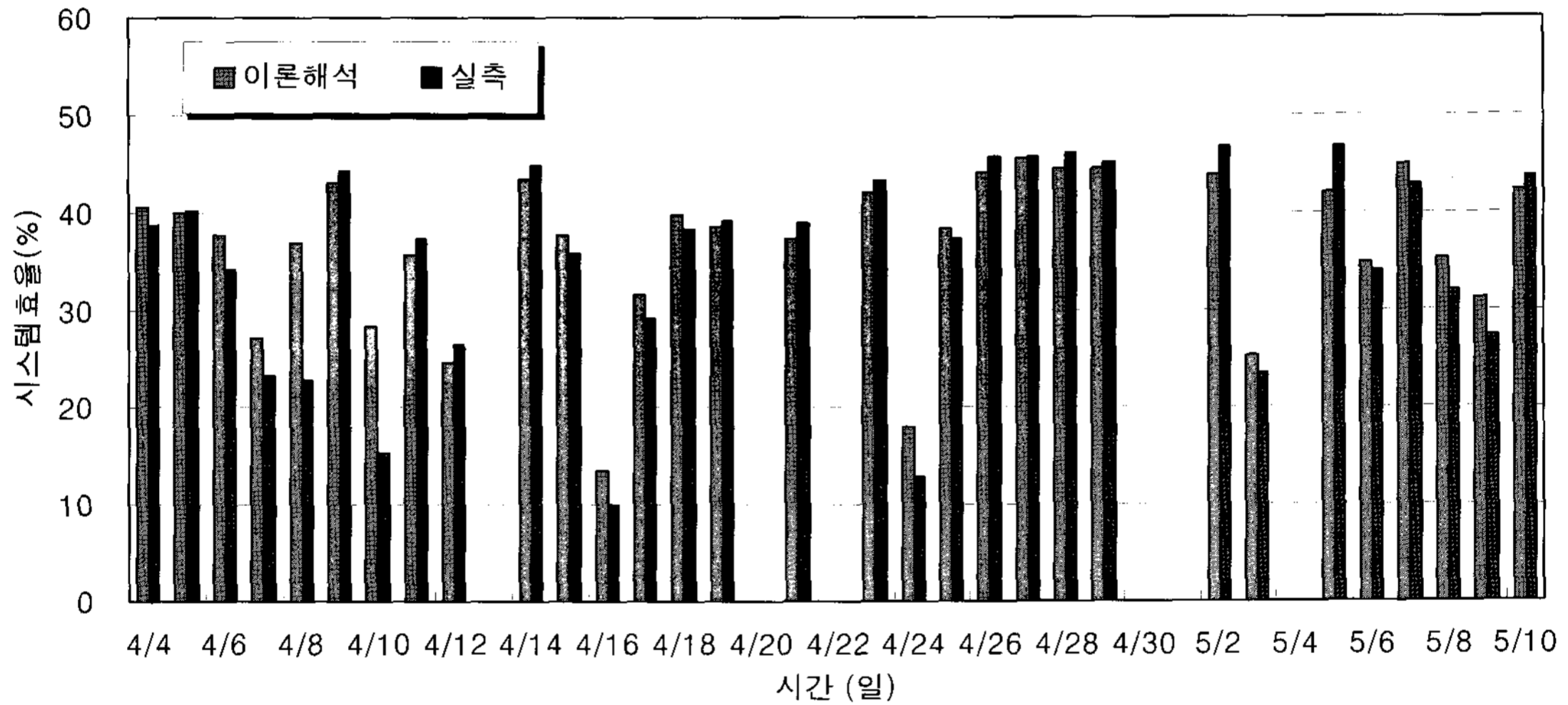


그림 4. 평판형 집열기의 시스템 효율

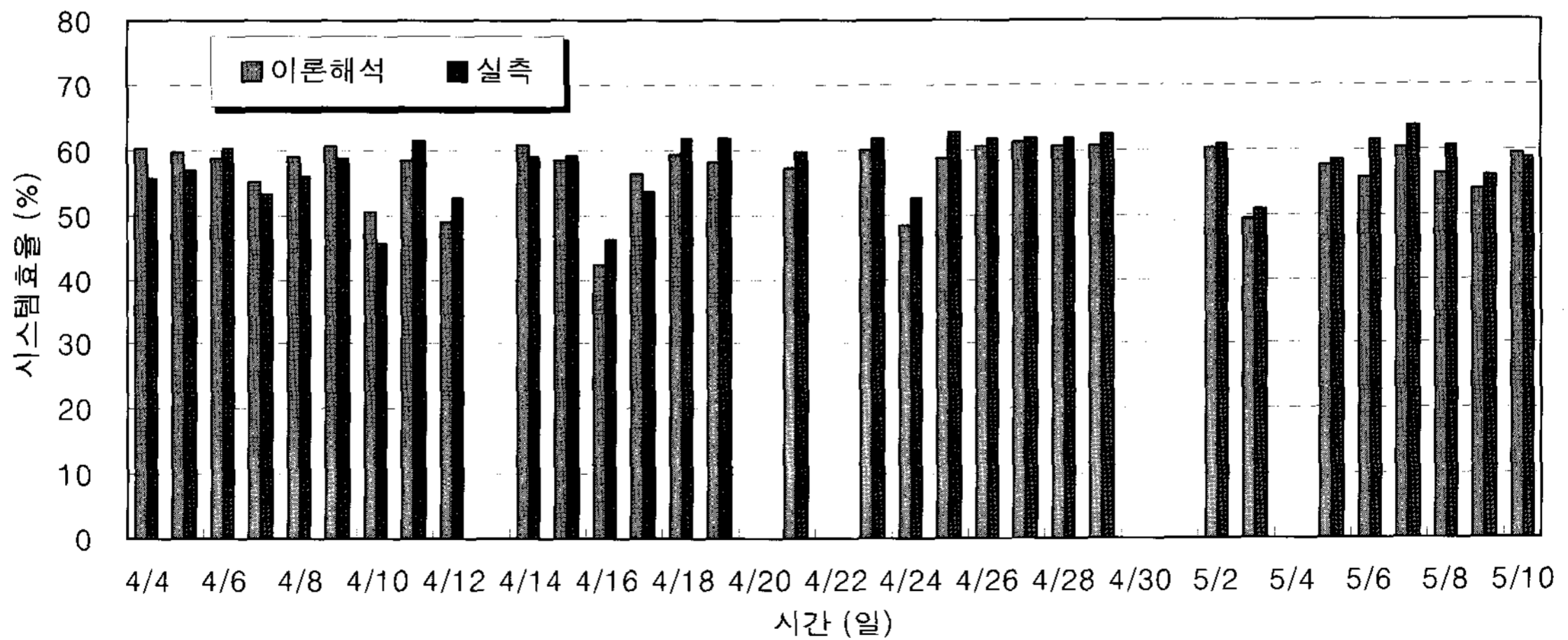


그림 5. 진공관형 집열기의 시스템 효율



비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 5은 진공관형 집열기의 일별 시스템 효율을 비교한 것이다. 이론해석과 실측에 따른 이 기간의 평균 시스템 효율은 각각 58.1%와 59.1%로서 거의 일치하고 있으며, 일별 시스템 효율에서는 평판형 집열기와 동일하게 5% 미만의 차이를 보이고 있다. 열손실계수가 작은 진공관형 집열기의 특성상, 시스템 효율의 일별 편차가 평판형에 비해 상당히 적은 것을 알 수 있다. 일반적으로 열손실 계수가 큰 집열기 일수록 일사량 강도에 따라서 효율이 크게 변하는데(일사량 강도가 크면 높고 낮으면 낮아짐) 바로 열손실 계수가 상대적으로 큰 평판형 집열기의 효율변화가 큰 것은 이러한 이유 때문이다.

그림 6은 4월 27일 태양열시스템 작동에 따라 각각의 집열열교환기를 통과하면서 승온된 지역난방수 온도를 나타낸 것이다. 여기서 ()안의 1차 및 2차는 각각 평판형과 진공관형 집열열교환기를 의미하는 것이다. 이 그림에서 보면 태양열시스템이 작동되는 아침 09시경부터 오후 16시 정도까지 55°C 내외의 지역난방수 환수가 1차 집열부에서 15°C( $\Delta T$ )정도 승온된 후, 2차 집열부에서 다시 85°C 내외로 승온되고 있다. 즉, 정온제어장치에 의해 태양열시스템이 적절하게 제어되고 있으며, 이론해석과 실측에 따른 시스템의 가동 및 정지시점과 1·2차 온도분포가 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

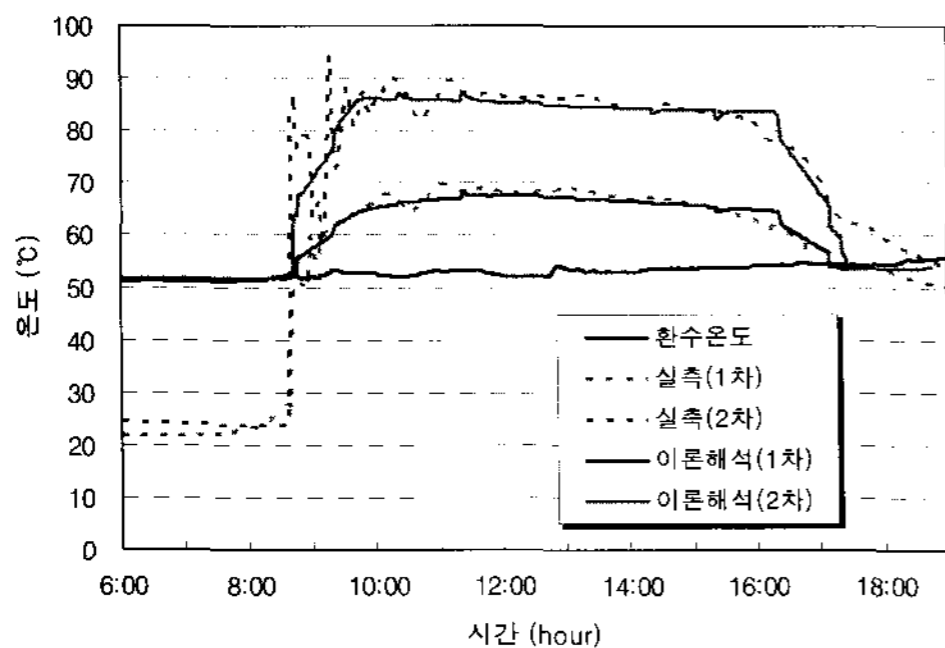


그림 6. 난방수의 열적 거동

#### 4. 결과분석

본 연구에서는 분당지역 지역난방시스템에 적용된 태양열 시스템의 연간 열성능을 지난 4년 동안(2003~2006년)의 기상자료를 이용하여 분석하였다. 여기에 사용된 수평면 일사량, 외기온, 상대습도 등 기상자료는 수원 기상청에서 측정된 실측자료이다.

그림 7은 시뮬레이션에 사용된 분당지역 지역난방시스템의 연간 열부하 특성(난방수 유량과 공급 및 환수온도)을 나타낸 그래프이다. 난방수 공급 및 환수온도는 각각 100°C와 50°C 정도이며, 하절기에도 급탕 및 냉방으로 상당한 열부하가 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

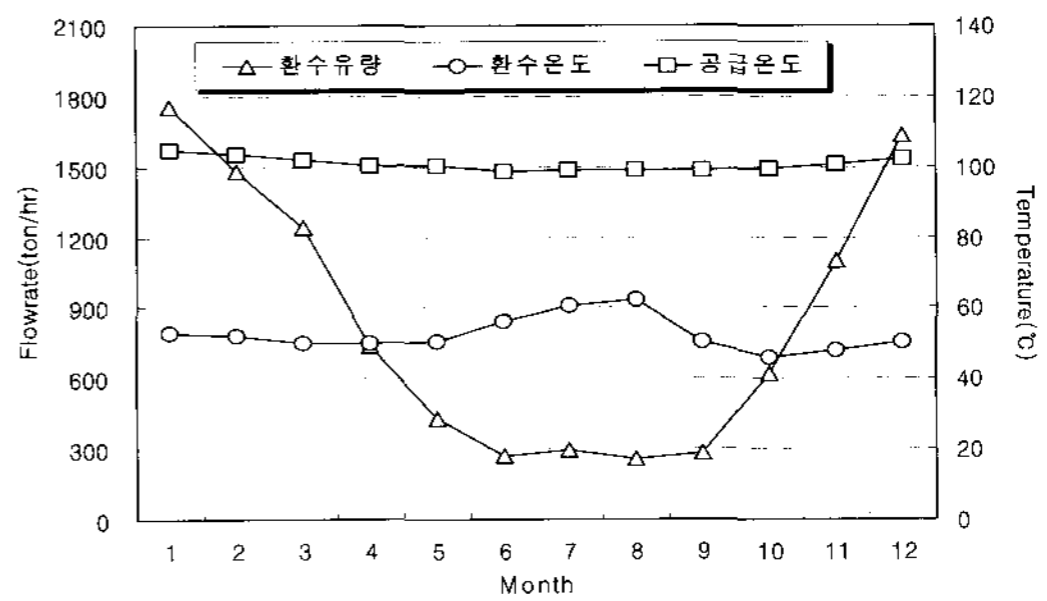


그림 7. 난방수 공급유량과 공급 및 환수온도

표 3과 표 4에 연도별 태양열 시스템의 평균 시스템 효율 및 연간 집열량을 각각 나타내었다. 4년간 평균 시스템효율은 집열기 전면적을 기준으로 할 경우 평판형 집열시스템이 33.4%, 진공관형 집열시스템이 41.2%가 되는 것으로 나타났다. 연도 별로 약간의 차이는 있으나 열손실 계수가 작은 진공관 집열기의 시스템 효율이 평판형 집열기에 비해 당연히 높은 것으로 나타났다. 그러나 평판형 집열기의 경우에도 작동온도가 충분히 높음을 감안하면 시스템효율이 비교적 높게 나타난 것으로 사료된다. 연간 총 집열량은 2342.3GJ로서 평판형이 35.4%와 진공관형이 64.6%가 되는

것으로 나타났다. 집열기별 단위면적( $m^2$ )당 연간 집열량으로 보면 평판형과 진공관형 집열기가 각각  $1.92GJ/m^2$ 과  $2.37GJ/m^2$ 이 된다. 이것을 현재 에너지관리공단에서 적용하는 설치비 기준단가를 기준으로 보면 평판형 집열기가 오히려 집열량이 많다. 이 결과로 볼 때 경제성을 향상시키기 위해서는 평판형 집열기의 면적비를 조금 더 크게 해야 한다는 것을 알 수 있다. 즉, 진공관형 집열기만으로 지역난방용 태양열시스템을 구성하는 것 보다는 평판형과 진공관을 적당한 비율로 조합하는 것이 태양열시스템의 경제성을 향상시키는 방안이 된다고 볼 수 있다. 좀더 구체적으로 보면 지역난방수 환수의 일부를 태양열로 공급온도로 승온해서 공급하는 태양열시스템은 진공관식 집열기를 사용하든가 아니면 진공관과 평판형을 적당히 조합하는 방법이 있을 수 있다. 경제성 측면에서 보면 후자가 좋으며, 이 두가지 집열기의 면적비는 경제성이 가장 좋을 때의 면적비로 하는 것이 바람직하다.

표 3. 년 평균 시스템 효율(%)

집열기	년도	2003	2004	2005	2006	평균	
		평판형 집열기	전면적	31.9	35.0		34.0
		투과면적	34.2	37.5	36.4	35.1	35.8
진공관형 집열기	전면적	40.4	41.9	41.5	41.1	41.2	
	투과면적	55.4	57.3	56.9	56.2	56.5	

표 4. 연간 집열량(GJ)

집열기	년도	2003	2004	2005	2006	평균
		평판형 집열기	733.8	917.3	884.0	
진공관형 집열기		1380.0	1620.0	1596.0	1453.0	1512.3
합계		2113.8	2537.3	2480.0	2238.1	2342.3

월별 각 집열부별 집열효율은 그림 8와 그림 9에 있는바와 같다. 진공관형 집열기의 경우 집열효율은 년 중 거의 변화가 없는데 비해, 평판형 집

열기의 경우에는 계절간의 편차가 큰 것을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 평판형 집열기는 열손실 계수가 크기 때문에 나타나는 현상으로, 외기온이 낮은 동절기에 집열기로부터의 열손실 증가에 따라 집열효율이 크게 낮아지게 된다. 이와 같은 열적거동은 열손실 계수가 큰 집열기는 가급적 저온 집열에 적합하며, 열손실 계수가 작은 집열기는 고온영역에서도 시스템효율이 상대적으로 저하되지 않는 것을 의미한다.

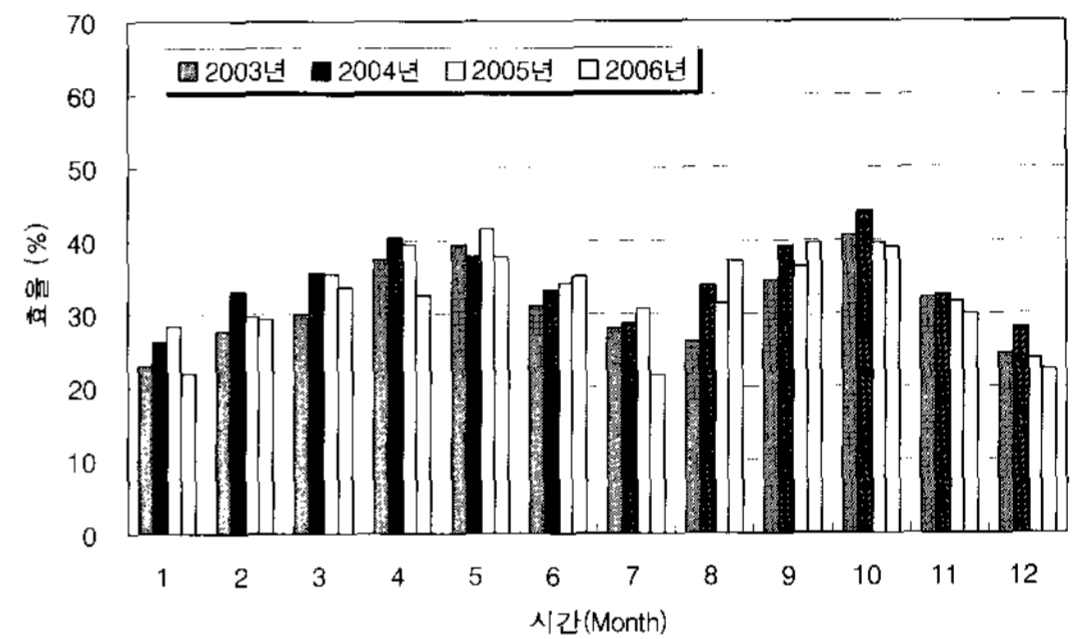


그림 8. 평판형 집열기의 시스템 효율

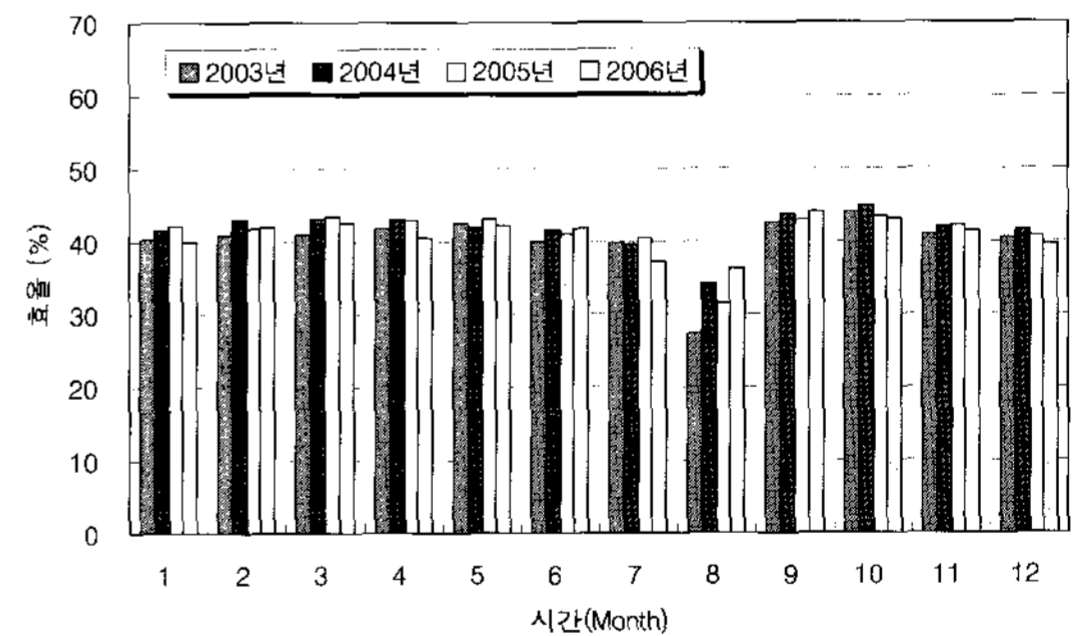


그림 9. 진공관형 집열기의 시스템 효율

## 5. 결 론

본 연구에서는 지역난방시스템에 적용된 태양열시스템의 사례분석을 통하여 시스템의 열적거동 및 장기 열성능을 검토하였다. 이 시스템은 환수되는 지역난방수를 공급수의 온도와 근사하게 일

정온도 이상으로 가열하여 공급배관에 직접 넣어 주는 축열조가 없는 방식으로 이를 위해서 시스템은 다음과 같이 설계되었다.

- 집열부는 평판형과 진공관형 집열기로 구분되어 집열열교환기를 통해 직렬로 연결되었으며,
- 축열조 없이 태양열 집열기에서 직접 설정온도로 가열하기 위해 변유량 차온제어방식을 개발 사용하였다.

이 시스템에 대한 시뮬레이션은 실증실험을 통해 타당성이 검증된 TNRSYS 모델을 이용하여 실시하였으며, 분석결과를 요약하면 다음과 같다. 분석은 수원지방 기상청에서 측정된 4년 동안의 기상자료(2003년부터 2006년까지)를 근거로 하였다.

- 집열기 전면적 기준 연평균 시스템 효율은 평판형은 33.4 %, 진공관형은 41.2 % 되는 것으로 나타났다.
- 연간 평균 집열량은 2342.3 GJ로서 평판형과 진공관형이 각각 35.4%와 64.6%의 분포를 나타냈으며
- 집열기별 단위면적( $m^2$ )당 연간 집열량은 평판

형이  $1.92GJ/m^2$ , 진공관형이  $2.37GJ/m^2$ 으로 에너지관리공단에서 적용하는 설치비 기준 단가를 기준으로 보면 평판형 집열기가 약간 많은 것으로 분석되었다. 이 결과로 볼 때 경제성을 향상시키기 위해서는 평판형 집열기의 면적비를 조금 더 크게 해야 하는 것이 좋다. 이 외에도 각 집열부의 작동특성 등 본 분석결과는 향후 지역난방용 태양열시스템은 설계에 활용되어 보다 효율적인 시스템을 설계하는데 기여할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

1. 대규모 태양열 지역난방 및 급탕 시스템 개발 및 적용 연구, 산업자원부, 2007. 5
2. "태양열시스템 최적화와 신뢰성 향상을 위한 설계 및 성능기준 개발과 실증시험 연구", 백남춘 외, 2002. 12
3. TRNSYS 14.2 Reference manual, University of Wisconsin -Madison, 1996.