

단독주택용 태양열/지열 융복합시스템의 태양열 급탕성능 평가

An Evaluation of the Solar Thermal Performance of the Solar/Geo Thermal Hybrid Hot Water System for a Detached House

백남춘(Namchoon Baek)¹, 한승현(Seunghyun Han)², 이왕제(Wang Je Lee)¹, 신우철(Ucheul Shin)^{3*}

¹한국에너지기술연구원, ²한국환경건축연구원, ³대전대학교 건축공학과

¹Solar thermal Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, 34114, Korea

²Korea Research Institute of Eco-environmental Architecture, Seoul, 06138, Korea

³Department of Architectural Engineering, Daejeon University, Daejeon, 34520, Korea

(Received August 24, 2015; revision received September 16, 2015; Accepted: September 30, 2015)

Abstract In this study, an analysis was performed on the performance of the solar water heating system with geo-thermal heat pump for a detached house. This system has a flat plate solar collector (8 m^2) and a 3 RT heat pump. The heat pump acts as an auxiliary heater of the solar water heating system. These systems were installed at four individual houses with the same area of 100 m^2 . The monitoring results for one year are as follows.

(1) The average daily operating time of the solar system appeared to be 313 minutes in spring (intermediate season), and 135 minutes and 76 minutes in winter and summer respectively. The reason for the short operating time in summer is the high storage temperature due to low water heating load. The high storage temperature is caused by a decrease in collecting efficiency as well as by overheating. (2) The geothermal heat pump as an auxiliary heater mainly operates on days of poor insolation during the winter season. (3) Despite controlling for total house area, hot water consumption varies greatly according to the number of people in the family, hot water usage habits, etc. (4) The yearly solar fraction was 69.8 to 91.5 percent, which exceeds the maximum value of 80% as recommended by ASHRAE. So the solar collector area of 8 m^2 appeared to be somewhat greater for the house with an area of 100 m^2 . (5) The observed annual efficiency of solar systems was relatively low at 13.5 to 23.6%, which was analyzed to be due to the decrease in thermal efficiency and the overheating caused by a high solar fraction.

Key words Solar thermal system(태양열시스템), Ground source heat pump(지열히트펌프), Solar fraction(태양열의 준율), Solar hot water system(태양열 급탕시스템)

† Corresponding author, E-mail: shinuc@dju.kr

1. 서 론

2011년 기준 국내 주거건물의 연간 에너지 소비는 국내 총 에너지 소비량의 12%를 차지하고 있다. 국토부는 2025년 에너지 제로 주택을 목표로 2009년부터 단계적으로 에너지 절감 수준을 제시하고 ‘건축물의 에너지 절약설계기준’ 등의 규정을 강화하고 있다. 이와 같은 제로 에너지주택은 단열 및 기밀강화와 고효율기기 등을 통한 부하저감기술을 통해 부하를 줄이고 잔여부하는 재생에너지를 통해 공급하게 된다.

주거건물의 에너지는 용도별로 난방 및 냉방, 급탕, 조명, 환기, 조리, 플러그 등으로 구분된다. 냉·난방 및 조명, 환기 등의 부하는 부하저감 기술에 따른 절감효과가

뚜렷한데 반해 급탕부하의 절감은 한계가 있는 실정으로 재생에너지를 통한 에너지 급탕공급이 전제되어야 절감 및 제로화가 가능하다. 현재 주거용 건물에 적용 가능한 재생에너지는 태양광 및 태양열, 지열 시스템으로 한정되어 있는데 이중 급탕부하 공급과 관련하여 태양열 시스템이 현실적인 대안으로 제기되고 있다.⁽¹⁾

그러나 국내 태양열 시스템의 보급현황을 살펴보았을 때, 기존 주택의 옥상이나 지붕면에 추가로 설치되는 집열기로 인해 건축 구조나 의장 측면에서 문제점이 지적되고 있다. 또한, 동·하절기 열수요와 공급의 불균형과 과다용량 설계에 따른 하절기 과열현상, 고장발생 등이 주요 현안으로 대두되고 있다.

국내의 주거용 건물을 포함한 태양열 급탕시스템에

관련된 연구 동향을 살펴보면 제11호 et al.⁽²⁾은 콤팩트형 태양열/지열 하이브리드 시스템을 개발하여 실험주택을 대상으로 태양열시스템의 작동상태와 열성능을 평가하였고, Shin et al.⁽³⁾은 공동주택에 태양열 시스템 적용 가능성과 최적 설계기법을 파악하기 위해 아파트를 대상으로 열적 거동특성을 분석하였다. 또한, Kim et al.^(4,5)은 태양열 급탕시스템의 신뢰성을 확보하기 위해 실증실험과 시뮬레이션을 바탕으로 시스템의 문제점 및 의존율 등을 파악하여 시스템 설계 및 작동조건, 경제성 등을 평가하였고, Jang et al.⁽⁶⁾은 급탕시스템의 부하온도에 따른 열성능과 경제성을 시뮬레이션을 바탕으로 분석하였다. 그러나 이들 연구의 대부분은 목업실험(Mock-up experiment)이나 시뮬레이션 등에 한정된 연구로서 주거용 건물의 실제 급탕부하나 제어조건 등을 반영하는데 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 거주하는 단독주택(이하, 실증주택) 4세대를 대상으로 태양열/지열 융복합 급탕시스템의 태양열 성능분석과 열적거동을 분석했으며, 이를 통해 향후 주거건물의 태양열 급탕시스템의 성능개선 및 시스템 보완과 보급 촉진을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실증주택 및 태양열 급탕시스템 개요

2.1 실증주택

Fig. 1은 전라북도 고창군에 위치한 주거단지의 전경으로, 이는 동일한 규모(연면적 100 m²)의 단독주택 100세대와 커뮤니티센터 1개동으로 구성되어 있다. 이 중 29세대에 태양열/지열 융복합 급탕시스템이 적용되었지만 본 연구에서는 원격 웹 모니터링 시스템이 설치된 4개 주택(정밀측정 세대)을 대상으로 급탕시스템의 열적거동을 분석하였다.

2.2 태양열/지열 융복합 급탕시스템

태양열 시스템은 신재생에너지 중 가장 열효율이 좋으



Fig. 1 Panorama of demonstration community.

나, 단독 사용 시 100% 열공급이 어려운 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 본 실증주택은 태양열 시스템과 함께 지열히트펌프(이하 GSHP)를 이용하여 냉·난방과 급탕(태양열 백업용)을 공급하였다. 이러한 태양열/지열 융복합시스템은 신재생에너지만으로 급탕열원을 100% 공급할 수 있게 된다.

Fig. 2는 실증주택의 융복합 급탕시스템 계통도를 나타낸 것이다. 이 시스템은 집열 열교환기 축열조 내장형으로 태양열 시스템이 축열탱크의 중·하단부를, GSHP가 축열탱크의 상단부를 직접 가열하는 방식으로 GSHP에 의한 태양열 집열효율의 저하를 최소화하였다.

Table 1은 융복합 급탕시스템의 주요 사양을 나타낸 것이다. 각각의 주택에 J사의 평판형 집열기 4장(전면적 기준 총 8 m²)을 정남향 지붕면에 경사각 30°로 설

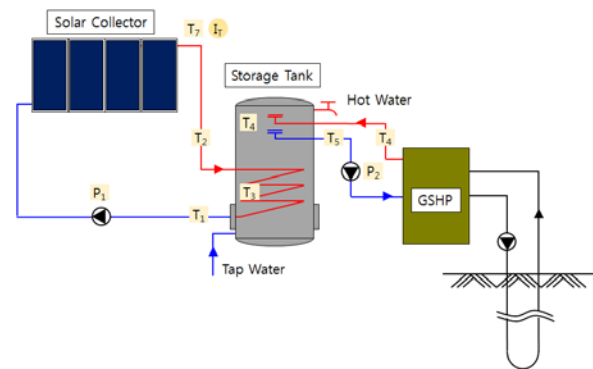


Fig. 2 Schematic of solar hot water system.

Table 1 Technical parameters of Solar hot Water system

Items	Specifications
Collector	$F_R(\tau_\alpha)$ 0.7718
	F_{RUL} 4.7452 W/m ² K
	Dimension 1,000 mm×2,000 mm×80 mm
Storage Tank	Type Horizontal Cylinder
	Volume 300 ℓ
	Insulation 100 mm
Control	Type Temperature Difference
	ΔT_{on} 15 °C ΔT_{off} 3 °C
Solar pump	Flowrate 14.3 LPM
	Power 110 W
GSHP	Capacity 3 RT
GSHP pump	Flowrate 12.8 LPM
	Power 170 W

치하였다. 축열탱크는 수평 원통형(횡형)으로 용량은 300 ℓ 이다.

2.3 제어 방법

태양열 시스템 제어는 차온제어방식으로 ΔT_{on} 및 ΔT_{off} 는 각각 15℃와 3℃이며, 축열조 중·상단부 온도가 95℃ 이상이면 집열펌프는 더 이상 작동되지 않는다. 융복합 급탕시스템에서의 태양 열급탕 백업설비인 GSHP는 축열탱크의 중·상부 온도가 45℃ 이하가 되면 작동되기 시작하고 47℃ 이상이 되면 작동을 멈추게 되어 태양열이 부족하더라도 축열조 상단부 온수의 온도를 항상 직접 사용가능한 온도로 유지시켜 주면서 이것에 의한 태양열 집열효율 저하를 최소화 시켜주게 된다.

2.4 웹 기반 원격 모니터링 시스템

모니터링을 위해 Fig. 2의 계통도에 표시된 바와 같이 온도센서(T) 7개와 펌프 단락신호(P) 2개, 일사계(I) 1개 등이 설치되었다.

Fig. 3은 웹기반 원격 모니터링 개념도를 나타낸 것이다. 각 주택에서 측정된 데이터는 내부 통신망을 통해 중앙 컴퓨터에 수집된 후 TCP/IP 통신을 통해 서버 컴퓨터의 데이터베이스에 1분 간격으로 저장된다.

3. 태양열 급탕시스템 열적거동

실증주택의 태양열 급탕시스템 열적 거동을 알아보기 위해 A주택(1개 세대)을 대상으로 2013년 08월 01일부터 2014년 07월 31일까지 1년간의 모니터링 자료를

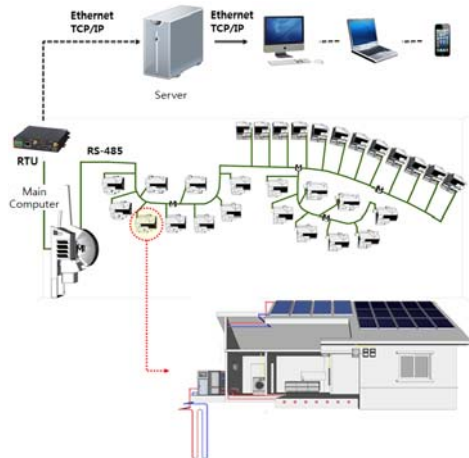


Fig. 3 Schematic of Web-based Remote Monitoring System.

를 분석하였다.

3.1 중간기 열적거동

Fig. 4는 중간기에 해당하는 4월의 6일간 집열기 입·출구 온도와 축열탱크 상·하부온도, 태양열 집열 펌프와 지열히트펌프 작동상태를 나타낸 것이다. 이 기간 동안 축열탱크 상부의 온도는 56~85℃로 지열히트펌프는 작동하지 않고 태양열 시스템으로만 급탕 공급이 이루어졌다. 축열과정에서 상·하부 온도는 동일하게 나타났는데, 이는 중·하단부에 위치한 내부 열교환기 때문인 것으로 판단된다. 태양열 시스템이 정지된 이후 급탕 사용으로 인한 방열과정에서는 상·하부 온도 성층화가 뚜렷하게 나타났다. 이 때, 태양열 펌프는 지속적으로 작동하지만 축열탱크의 온도가 높고 일사량이 적어지는 오후 늦게부터 작동과 정지(on and off)가 반복되는 것을 알 수 있다. 이 과정에서 태양열 집열기의 출구 온도는 순간적으로 100℃를 초과하지만 일시적인 것으로 과열문제는 없는 것으로 판단된다. 중

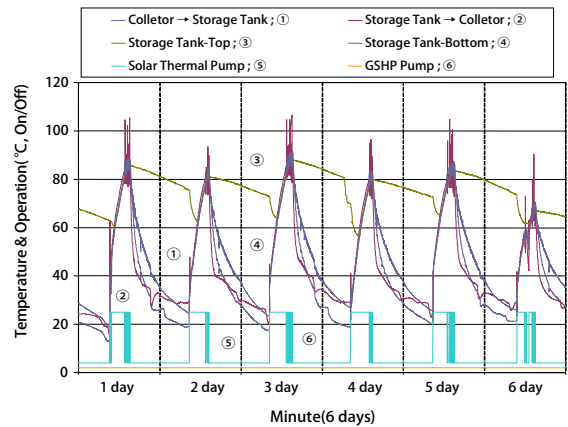


Fig. 4 Thermal behavior of spring season.

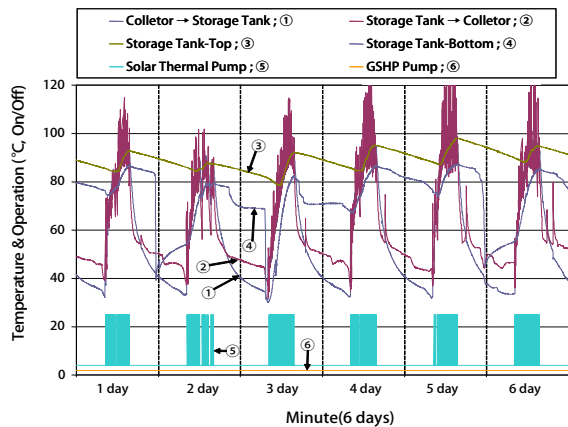


Fig. 5 Thermal behavior of summer season.

간기 분석기간 6일 동안의 집열펌프 일일 평균 작동시간은 313분으로 나타났다.

3.2 하절기 열적거동

Fig. 5는 일사조건이 양호한 하절기 6일간(8월 9일 ~8월 14일) 시스템의 열적거동을 나타낸 것이다.

축열탱크 상부의 작동온도는 82~95°C로서 화상한 계온도인 58°C를 지속적으로 초과하는 것으로 나타나 급탕사용 시 어린이나 노약자의 고온수에 대한 주의가 요구된다. 태양열 펌프는 오전부터 작동과 정지(on/off)를 지속적으로 반복했다. 이러한 현상을 완화하기 위해서는 차온제어기의 ΔT_{off} 의 설정을 동절기나 중간기에 비해 낮게 조정할 필요가 있다.⁽⁷⁾ 이 과정에서 태양열 집열기의 출구 온도는 지속적으로 100°C를 초과하여 집열기 내부압력증가와 집열열매체 비등이 우려된다. 이는 급탕부하에 비해 시스템의 과다 용량설계에 따른 것에 일부 기인한다. 하절기 분석기간 집열펌프의 일일 평균 작동시간은 76분으로 나타났다.

3.3 동절기 열적거동

Fig. 6은 일사조건이 불균일한 동절기 6일간(1월 1일 ~1월 6일)의 시스템의 열적거동을 나타낸 것이다. 축열탱크 상부의 온도는 일사의 조건에 따라 45~71°C까지 변화하며, 저녁부터 새벽까지 지열히트펌프의 작동이 간헐적으로 이루어졌다. GSHP는 설정된 제어조건에 따라 축열탱크 상부의 온도가 45°C 이하가 될 때 작동됐고 47°C에서 정지됐으며, 이 과정에서 태양열 집열효율 저하에 영향을 미치는 축열탱크 하부의 온도는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 동절기 분석기간 동안 집열펌프와 GSHP는 일평균 작동시간은 각각 187분과 35분으로 나타났다.

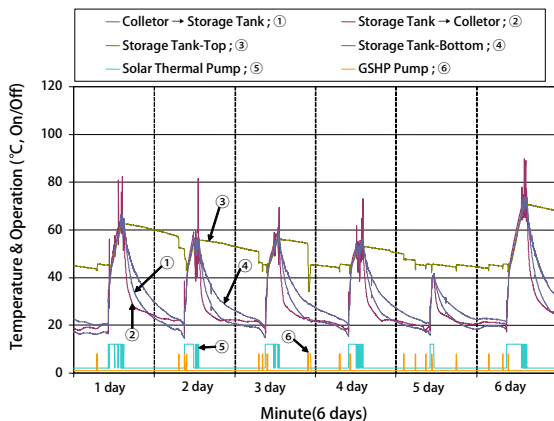


Fig. 6 Thermal behavior of winter season.

한편 분석기간 다섯째 날과 같이 일사조건이 좋지 않은 날에는 GSHP로 급탕공급이 지속될 경우 축열탱크의 온도가 45°C 이하로 낮아질 수도 있어 레지오넬라균(legionella)의 증식이 우려된다.⁽⁸⁾

4. 태양열 급탕시스템 열성능 평가

본 연구에서 태양열 급탕시스템 열성능 평가는 태양열과 보조열원(GSHP)으로부터 축열탱크로 공급되는 생산열량을 기준으로 하였으며, 계산된 생산열량은 배관 및 축열탱크의 열손실이 포함되어 있다.

4.1 태양열 의존율

Fig. 7은 월별 태양열 의존율을 나타낸 것으로 5월부터 10월까지 모든 주택의 태양열 의존율이 90~100%로 태양열만으로 급탕 공급을 대부분 감당 할 수 있는 것으로 나타났다. 이 기간 동안 축열탱크의 중·상단부 온도는 약 95°C로 높아지지만 이 때, ‘2.3 제어방법’에서 서술한 바와 같이 과열방지 기능이 작동하여 시스템 과열을 방지하게 된다.

Fig. 8은 실증주택 4세대의 연간 총 급탕 생산열량을 태양열과 GSHP로 구분하여 나타낸 것이다. 총 급탕 생산열량이 가장 많은 B주택은 4,003 kWh로서 가장 적은 D주택의 1,759 kWh에 비해 2.3배 이상 많은 것으로 나타났다. 동일한 규모의 주택임에도 불구하고 가족구성 및 거주자 수, 온수 사용 습관 등에 따라 급탕사용량의 편차가 큰 것을 알 수 있다. 또한, B주택에 비해 태양열 공급열량이 57%에 머무르는 D주택의 경우에도 보조열원(지열히트펌프)에 의해 급탕공급이 이루어지고 있으며, 태양열 공급에 따라 대체로 증가 추세를 보이고 있다.

연간 태양열 의존율은 A주택이 87.9%, B주택 69.8%,

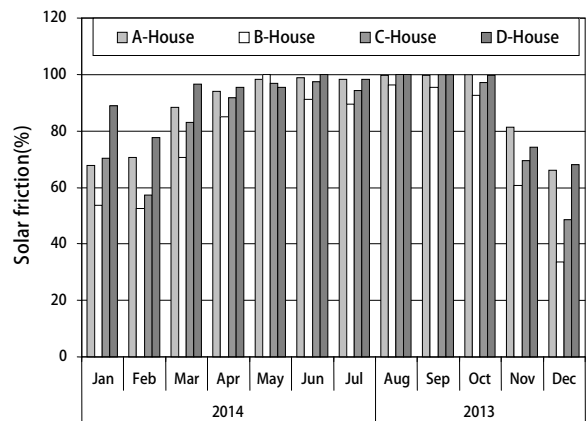


Fig. 7 Monthly solar friction.

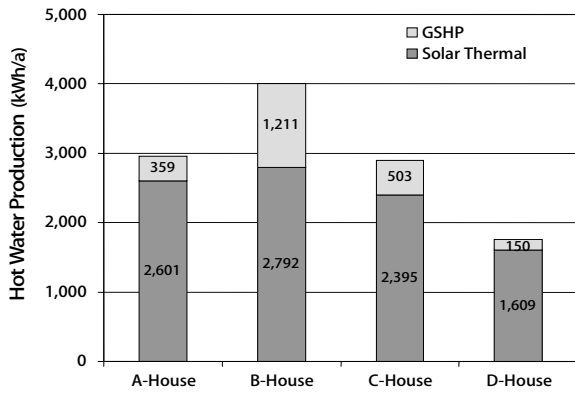


Fig. 8 Annual heat delivered by the solar hot water system and auxiliary system.

C주택 82.6%, D주택 91.5%로 각각 분석되었다.

4.2 태양열 시스템 집열효율

Fig. 9는 실증주택 4세대에 대한 연간 태양열 시스템 집열효율과 의존율을 나타낸 것이다. 시스템 효율은 태양열 의존율이 가장 높은 D주택의 경우 13.5%로서 23.6%인 B주택에 비해 효율이 낮은 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 급탕부하 대비 집열기 면적의 과다설치에 의한 것으로 시스템 설계 초기 단계부터 급탕부하를 고려한 적정용량 설계가 요구된다. 일반적으로 태양열 시스템은 Fig. 9에 있는 것처럼 태양열 의존율이 높아지면 태양열 작동온도도 높아지면서 집열효율이 낮아진다. 또한, 과열조건으로 인해 작동 가능한 조건임에도 불구하고 시스템이 정지해 있는 시간이 길어져 연간 태양열 시스템 효율은 저하되게 된다. 따라서 태양열 시스템 설계시 적정한 의존율이 되도록 설계하는 것이 필요하다. ASHRAE에서는 주택의 태양의존

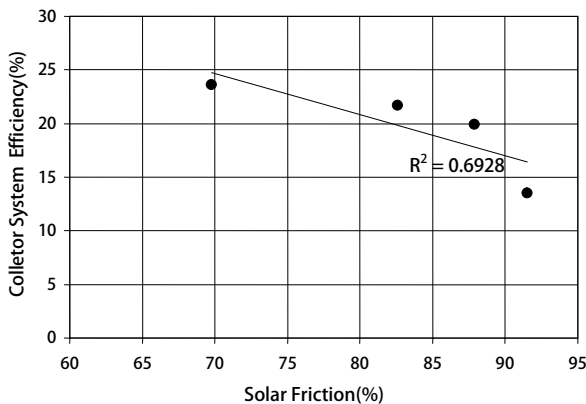


Fig. 9 Annual collector system efficiency with annual average solar friction.

율을 난방은 최대 50% 미만, 급탕은 최대 80% 미만의 시스템 규모(주로 집열면적)를 설계하도록 권고하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 단독주택의 지열히트펌프 보조열원 방식의 태양열 급탕시스템의 적용 타당성을 평가하기 위해 동일한 규모의 단독주택 4세대에 설치된 태양열 시스템에 대한 작동특성과 성능분석을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 태양열 시스템의 일 평균 작동시간은 중간기가 313 분로 가장 길었으며, 동절기와 하절기는 각각 135 분과 76분으로 나타났다. 일조시간이 가장 긴 하절기 작동시간의 감소는 급탕부하 감소로 인한 축열 탱크의 온도상승에서 기인(시스템 효율저하 및 과열방지 조건)하는 것으로 분석되었다.
- (2) 보조열원인 GSHP의 작동시기는 동절기 일사량이 좋지 않은 날로, 이 때 축열탱크의 온도는 50°C 이하가 된다. 낮은 일사조건이 장기간 지속될 경우 레지오넬라균 생육조건이 유지될 수 있어 향후 이를 위한 대책도 강구되어야 할 것으로 사료된다.
- (3) 동일한 면적과 지역, 급탕설비를 갖는 주택이라 할 지라도 가족구성원 및 가족 수, 생활습관 등에 따라 급탕사용량의 편차가 크게 나타났다.
- (4) 태양열 의존율은 69.8~91.5%로 ASHRAE에서 권고하는 최대치인 80%를 상회하고 있어 100 m² 정도의 주택에 집열면적 8 m²는 다소 크다는 것을 알 수 있다.
- (5) 연간 태양열 시스템 효율은 13.5~23.6%로 비교적 낮게 나타났다. 이는 높은 태양의존율과 높은 작동 온도로 인한 효율저하와 과열조건에서 기인하는 것으로 분석되었다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(과제번호 : 20133030080 840).

References

1. Mauthner, F. and Weiss, W., 2014, Solar Heat Worldwide 2012, SHC, IEA.
2. Baek, N. C., Jeong, S. Y., Yoon, E. S., and Lee, K. H., 2012, The Development and Performance Analysis of Compact Type Solar Thermal/Ground Coupled Heat Pump Hybrid System For Heating, Cooling and

- Hot water, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 5, pp. 59-67.
3. Shin, U. C., Baek, N. C., and Kim, J. H., 2006, Experimental Study on the Thermal Behavior of Solar Space Heating and Hot Water System in Apartment, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 26, No. 4, pp. 127-134.
 4. Kim, J. H., Kim, S. S., Kang, B. S., and Hong, H. K., 2004, Verification Experiment and Analysis for 6 kW Solar Water Heating System(Part 1 : Verification Experiment), Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 128-134.
 5. Choi, B. S., Kim, J. H., Kang, Y. T., and Hong, H. K., 2004, Verification Experiment and Analysis for 6kW Solar Water Heating System(Part 2 : Modeling and Simulation), Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 556-565.
 6. Jang, H. Y., Chung, K. T., Lee, S. B., and Suh, J. S., 2007, Performance and Economic Analysis of a Low-temperature Solar Domestic Heating System in a Single-Family House of 4-household, Proceeding of SAREK, pp. 1125-1130.
 7. Shin, U. C. and Baek, N. C., 2005, Thermal Performance of Solar Thermal System by On-Off Differential Temperature of Differential Temperature Controller, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 25, No. 2, pp. 1-8.
 8. Mathys, W., Stanke, J., Harmuth, M., and Junge-Mathys, E., 2008, Occurrence of Legionella in hot water systems of single-family residences in suburbs of two German cities with special reference to solar and district heating, Int. Journal of Hygiene and Environmental Health, Vol. 211, No. 2, pp. 179-185.