

한국형 태양열 온수급탕 시스템의 대책과 제안

김 성 수, 홍 희 기[†]
경희대학교 기계공학과

Measures and Proposal for Korean Solar Water Heating System

Sung Soo Kim, Hiki Hong[†]

Department of Mechanical Engineering, KyungHee University, Yongin 449-701, Korea

(Received March 4, 2008; revision received August 26, 2008)

ABSTRACT: Solar thermal systems are recently refocused by higher oil prices, but did not completely restore the people's confidence owing to the past bad systems. Several types of solar water heating systems were analyzed in characteristics and some proper systems were proposed under Korean climates and system scale. As a small system, natural circulation system should be installed only in a southern region of Korea, with a freeze protection valve instead of heating coil for freeze protection. In most area of Korea, the forced circulation type with a heat exchange coil inside a thermal storage tank or with a spiral-jacketed storage tank, proposed and verified by the authors, has a merit of stable performance and freeze protection.

Key words: Solar thermal energy(태양열 에너지), Water heating system(온수급탕 시스템), Freeze protection valve(동파방지밸브)

1. 서 론

유가급등과 기후변화협약의 발효로 신재생에너지의 중요성이 어느 때보다도 주목받고 있다. 전기에너지 생산을 위주로 하는 신재생에너지 3대 핵심분야(수소·연료전지, 태양광, 풍력)에는 포함되지 않으나, 변환형태가 열에너지인 태양열 시스템의 집중적인 보급과 확대의 필요성에 대해서 새삼 강조할 필요는 없을 것이다.⁽¹⁾

평판형과 진공관형 집열기로 획득할 수 있는 온수의 온도는 100℃를 넘기기 어려우므로 주 용도는 급탕과 난방에 국한된다. 난방 전용으로 사용하기에는 하절기의 긴 공백으로 경제성을 만족하기 어려우며 증발냉각 등의 기술이 획기적으로 개

발되어 접목되지 않는 한 난방 겸용 시스템의 일반화는 당분간 어려울 것으로 예상된다.

따라서 한국에 안정적으로 적용할 수 있는 용도는 급탕시스템이며 난방을 일부 겸하는 정도이다. 태양열 시스템이 국내에 적용된 지도 어느덧 30년 가까이 경과하고 있으나 여전히 보급이 미진하고, 부정적인 인식이 강한 이유에 대해서는 여러 가지 생각할 수 있으나,⁽¹⁾ 불안정한 성능과 화석연료 방식에 비해 경제성에서 불리한 점이 가장 큰 요인이다. 그러나 유가가 배럴당 100달러에 접근하고 있는 요즈음 50%의 설치지원금이 적용되는 태양열 온수급탕시스템은 경제성 면에 충분한 경쟁력을 확보한 상태이다.

태양열 온수급탕 시스템과 관련되는 요소기술은 선진국 수준의 90% 이상에 접근한 것으로 판단되나, 동파에 취약한 시스템 혹은 불안정한 성능을 보이는 시스템이 보급되는 경우 시장의 신뢰성을 회복하기 어렵다. 본 논문에서는 다양한 소형, 중

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2925; fax: +82-31-202-2625

E-mail address: hhong@khu.ac.kr

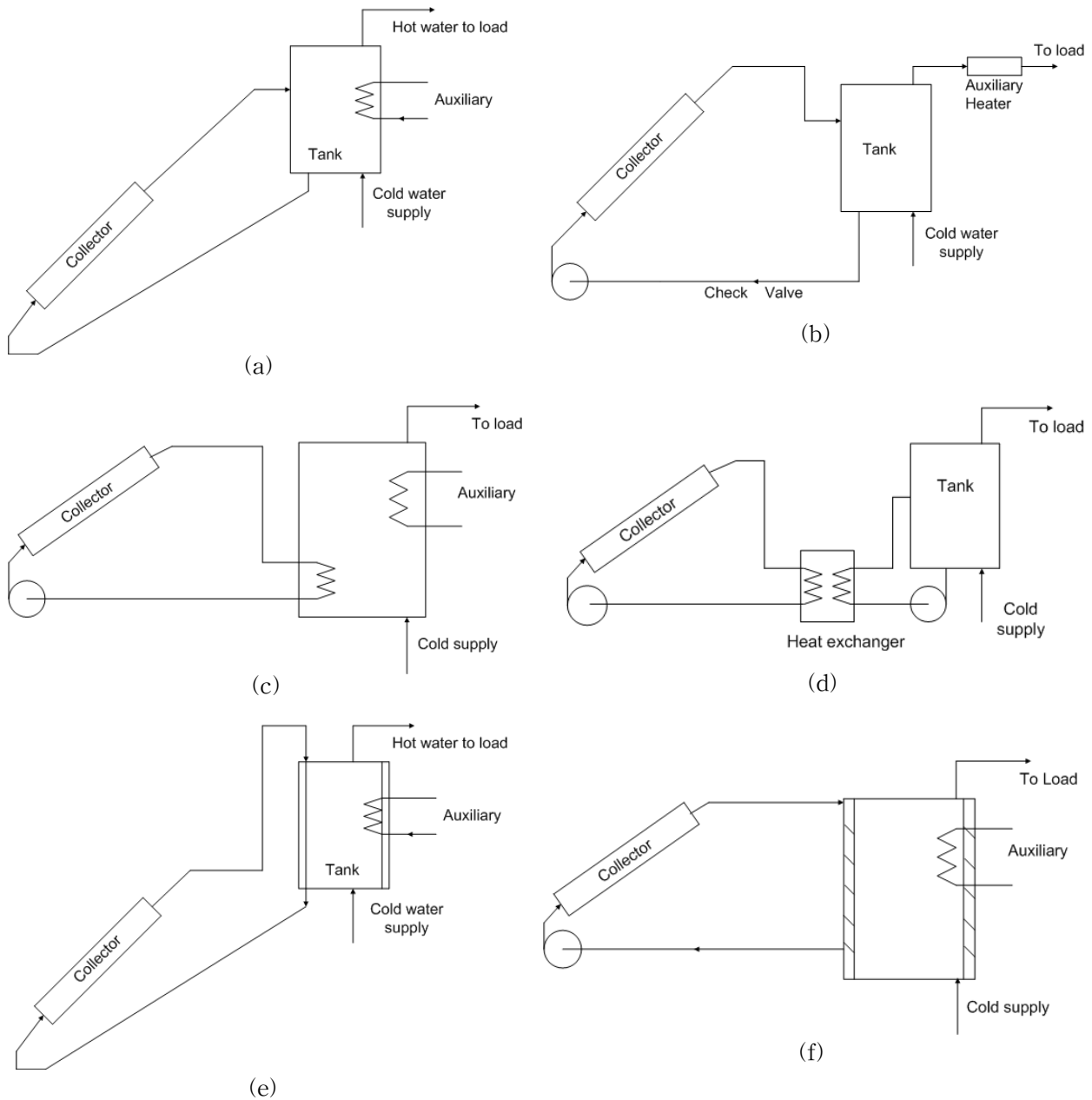


Fig. 1 Schematic of common configuration of solar water heaters.⁽²⁾

형 태양열 급탕 시스템에 대해 분석하고, 한국의 기상조건 및 생활패턴에 적합하면서도 표준화가 용이한 방식에 대해 제안하고자 한다. 특히 동파에 의한 시스템의 기능상실은 가장 경계해야 할 치명적인 문제이므로 주안점을 두고 분석하였다.

2. 시스템의 특징 분석 및 대책

태양열 온수급탕 시스템에는 다양한 방식이 제안되어 왔고 각각 장단점을 가지고 있다. 개략도를 Fig. 1에 정리하였다.

2.1 자연순환형(Fig. 1a)

가장 단순한 구조이면서도 효율적인 운전이 가능한 방식이다. 집열기의 작동매체는 밀도차에 의해 자연순환되며, 축열조 내에 성층화가 잘 유지되어 태양열의존도를 높일 수 있다. 이 방식의 가장 큰 단점은 0℃ 이하에서 동파의 가능성이 대단히 높다는 것이다. 따라서 이러한 기후조건 지역의에서는 작동매체로 부동액을 사용하고, 부하측의 수돗물은 조 내의 열교환코일을 통과하는 구조를 취하게 되어 이로 인해 효율저하를 초래하게

된다. 축열조가 집열기 상부에 위치하여 외기에 노출되기 때문에 외부에 위치하는 수도관의 동파에 대비해야 한다.

동결방지법에는 크게 트레이싱법(tracing technique)과 물을 빼는 방법이 있다.⁽³⁾ 국내의 자연형 태양열 온수기에는 주로 전열선에 의한 트레이싱법이 적용되고 있으며, 외기온도가 0℃ 이하로 떨어지면 배관을 가열하게 되는데 동결기가 길면 장기간의 빈번한 작동으로 전열선이 파손되기 쉬우며 소비전력도 매우 크다. 아열대 기후의 소형 시스템에 적합한 방식으로서 남부지방의 일부 지역에서는 적용이 가능하다. 동결기가 긴 중부 이북의 지역에는 전반적으로 이 방식은 부적합하다.

물을 빼는 방법은, 옥외에 노출된 배관 내부의 물이 동결점에 접근하면 동결방지밸브(freeze protection valve, FPV)를 개방하여 물을 연속적으로 외부로 빼냄으로써 동결을 방지하게 된다. 내부 물의 온도 혹은 대기온도가 일정 온도 이하이면 FPV를 개방하고 온도가 더 떨어지면 개도는 더욱 커지게 되며, 동결에 안전한 범위가 되면 다시 폐쇄되는 동작을 취하게 된다.

부산 지역의 최근 10년 동안의 기상데이터를 분석한 결과에 의하면 영하로 떨어지는 일수가 연중 평균 40.8일이나, 시간으로는 500시간 이하로 추정된다. 따라서 이와 유사한 기상조건을 갖는 남부 지방에 적용하는 경우 FPV법은 상당한 실효를 볼 수 있을 것으로 예상된다.

2.2 열교환기가 없는 강제순환형(Fig. 1b)

순환펌프에 의해 축열매체를 겸하는 작동매체인 물이 직접 순환되며, 집열기 입출구의 온도차를 감지하여 제어부에 의해 on/off 작동하게 된다. 열교환기를 사용하지 않으므로 집열기 입구온도를 낮출 수 있어 집열효율이 가장 높으며, 순환유량을 줄이는 경우 성층화를 촉진시킬 수 있어 태양열의존도도 높일 수 있는 방식이다. 0℃ 이하에서는 동파에 대비하여 집열기 및 배관의 물을 축열조 혹은 별도의조에 완전히 빼내는 구조를 취하게 된다. 이로 인해 개방형 축열조를 사용해야 하므로 펌프 동력 면에서 손해이며 공기와의 접촉으로 부식이 촉진되어 수명이 짧아지는 단점이 있다.

이와 같은 기존 개방형 시스템의 단점을 보완

하기 위해 밀폐형 축열조와 FPV를 사용하고, 옥외 배관 내의 물이 설정된 동결 직전의 온도가 되면 FPV를 개방하여 축열조보다 상부에 위치하는 옥외 배관 및 집열기의 물을 외부로 빼내는 구조를 제안한다. 중대형 시스템에 적용 가능하며 영하의 시간이 연간 500시간 이하의 남부 지방에 설치하는 것이 적합하다. 그러나 약간의 물이 옥외 배관에 남아 있으면 동파로 직결되므로 설계 및 시공시 배관의 적절한 구배 등 세심한 주의를 요한다.

2.3 축열조에 코일 내장 강제순환형(Fig. 1c)

동파 방지를 위해 집열기 순환 루프에는 부동액을 사용하고 축열조 내부에 내장된 열교환코일을 통해 열을 전달하는 방식이다. 외부 열교환기 방식에 비해 구조가 간단하나, 조 내의 열교환이 자연대류에 의존하므로 작은 열전달계수를 넓은 면적으로 보상해야 한다. 시스템이 커지는 경우 코일이 매우 길어져 소형 시스템에 적합한 구조이다.

2.4 열교환기가 있는 강제순환형(Fig. 1d)

혹한기가 있는 한국의 기후 특성에 가장 적합한 방식이며, 소형에서 대형시스템까지 적용이 가능하다. 그러나 2개의 순환 루프로 구성되고 펌프도 2대 필요하여 시스템이 복잡해지고 고장 가능성이 높아지며 초기 투자비용이 커져 소형시스템에는 그다지 유리하지 않다. 또한 원활한 열교환을 위해서는 충분한 유량이 요구되므로 성층화 유지에는 불리한 구조이다.

2.5 맨틀형 축열조를 갖는 자연순환형(Fig. 1e)

탱크 내 탱크(tank-in-tank) 방식으로 불리는 축열조로서,⁽⁴⁾ 작동매체는 탱크와 탱크 사이의 재킷부를 통과하면서 축열조 내의 물을 가열하게 된다. 열교환코일 내장 자연순환형보다 단순한 구조이다. 그러나 실외에 설치되는 축열조 내부의 대부분이 물로 채워져 있어 동파에 대단히 취약하기 때문에 한국의 기후조건에는 부적합하다. 소형의 강제순환형에 사용되기도 하며, 이 경우 축열조 열교환코일 내장 방식(Fig. 1c)과 특징은 유사하나 구조가 보다 단순해진다.

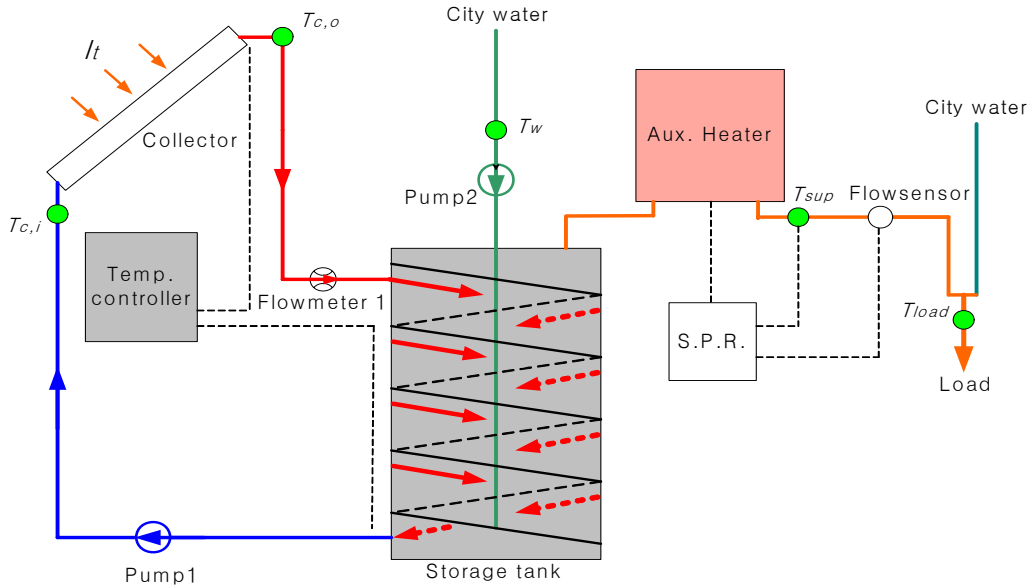


Fig. 2 Schematic of remodelled system with spiral-jacketed storage tank.

2.6 나선재킷형 축열조를 갖는 강제순환형(Fig. 1f)

맨틀형 축열조를 강제순환형에 확장한 것으로서 선행연구⁽⁵⁾를 통해 제안하고 그 실효성을 보인 바 있는 방식이다. 상세한 사항은 문헌(5) 및 Fig. 2를 참조하기 바라며, 맨틀형 축열조와 마찬가지로 별도의 열교환기를 설치하는 대신 축열조의 원통면을 열전달면으로 활용하게 되나, 유속을 보다 크게 할 수 있도록 궁리한 구조이다.

시스템이 커지면 집열면적에 비례하여 축열조 용량($\sim l^3$)이 증가하나 축열조 표면적은 l^2 로 증가하므로 열교환 능력을 높이기 위해서는 유속을 증가시킬 필요가 있다. 따라서 유로를 나선 구조로 하여 열전달계수를 높인 방식이며 구조가 간단하면서도 축열조 열교환코일 내장방식(Fig. 1c)와 동등한 효과를 얻게 된다.

3. 나선재킷 방식의 실증실험 및 분석

나선재킷형 축열조를 적용한 시스템은 설치 사례가 거의 없어 본격적인 보급 전에 충분한 검증이 필요하다.

선행연구를 통해 나선재킷형 축열조를 설계하고 제작한 후 기존의 열교환기가 있는 강제순환형(Fig. 1d)⁽⁶⁾을 개조하여, 집열기 4장 규모(집열면적 : $10m^2$, 축열용량 : 400 L)의 시스템을 구성하였다(Fig. 2). 일사조건이 양호한 기준조건(2003년

10월 15일 정오) 하에서 기존시스템⁽⁴⁾과 집열효율 및 획득열량이 같도록, 순환유량은 동일하게 유지한 채 나선재킷의 유로 폭과 피치를 결정하였다. 그 결과 일사 조건이 좋은 특정일(2004년 4월 29일)에 대한 실험을 통해 기존시스템에 비해 집열효율은 2.5% 정도 감소하나 태양열의존도는 거의 차이가 없는 것으로 파악되어 시스템의 성공적인 설계 및 운전을 보인 바 있다.⁽⁵⁾ 그 후 2년 여의 장기적인 실제상황(대학원생 대상의 샤워실)의 운전을 통해 시스템에서 발생하는 문제점을 파악하고 지속적으로 성능을 평가하였다.

2005년 10월에 대한 1개월의 실측데이터를 정리한 것이 Table 1이다. 기존시스템에 대한 동일 조건 하에서의 실험은 불가능하므로, 이에 대해서는 이미 검증된 시뮬레이션 기법(TRNSYS)을 통해 예측하였다. 기상조건은 실험과 동일하게 설정하였으며, 1개월 간의 부하패턴을 분석하여 Fig. 3과 같이 주중과 주말로 구분하여 입력하였다. 기존시스템에 대한 시뮬레이션 결과를 Table 1에 함께 정리하였다.

기존의 열교환기가 있는 강제순환시스템에 비해 획득열량은 4%포인트, 태양열의존도는 10%포인트 정도 낮은 값을 보였다. 일사조건이 좋은 특정일에 대한 결과보다 성능이 저하된 이유로는 실험값에 비해 시뮬레이션이 다소 크게 예측하는 경향도 있으나, 집열기 등 구성요소의 열화와 배관 및 축열조의 스케일 형성 등을 생각해볼 수 있다.

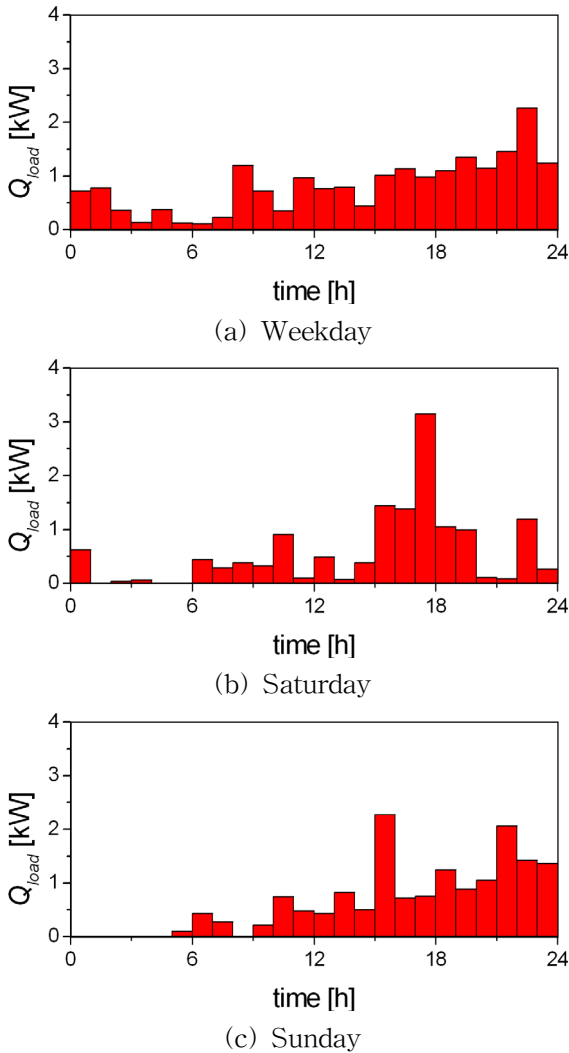


Fig. 3 Load patterns used in simulation.

이러한 요인들을 감안하면, 기존시스템과 동일 유량을 유지한 상태에서 설계를 함으로써 집열효율 및 획득열량의 관점에서는 거의 대등한 성능을 보일 것으로 판단된다.

그러나 태양열의존도(총 부하 중 태양열로 공급한 부하의 비)가 상당히 감소하는 이유로는 충분한 설명이 되기 어려우며, 성층화 정도로서 분석할 필요가 있다. 즉 동일 유량을 유지함으로써 집열기 입출구 온도차 및 축열조 상하부 온도차는 2~3℃ 정도로 완전혼합에 가까운 양상을 띠었다. 일사조건이 좋은 날은 집열열전기가 종료되는 시점에서 보조열원 작동 설정온도(40℃) 이상이 되어 보조열원의 작동없이 저장된 온수는 유효하게 사용되고 기존시스템과 마찬가지로 태양열의존도가 높다. 그러나 일사조건이 그다지 좋지 않은 날은 조 전체가 설정온도 이하로 되어 부하가 걸릴 때

Table 1 Performance comparison between the previous and the new systems

(Unit : MJ)

| | Previous system | New system | Difference (%) |
|-------------------------------|-----------------|------------|----------------|
| Irradiation | 4,213 | 4,183 | 0.0 |
| Acquired heat | 1,684 | 1,499 | 11.2 |
| Heat load | 2,004 | 2,004 | 0.0 |
| Auxiliary heat | 528 | 721 | -26.8 |
| Heat supplied by solar system | 1,476 | 1,283 | 15.0 |
| Efficiency(%) | 40.0 | 35.8 | 11.7 |
| Solar fraction(%) | 74 | 64 | 15.6 |

마다 보조열원이 작동된다. 반면에 열교환기를 사용한 기존방식도 그다지 좋은 성층화를 유지하는 편은 아니나, 열교환기에서 가열된 물이 축열조 상부로 직접 유입됨으로써 간헐적으로 일사조건이 좋은 날에는 상부의 물은 설정온도 이상을 유지하며 보조열원의 작동없이 부하측에 공급될 수 있다. 분석결과 일사조건이 좋지 않은 날의 태양열 의존도는 기존시스템보다 10%포인트 이상 떨어지는 것으로 확인되었으며 이와 같은 다양한 일사조건이 혼재되어 있는 월간 운전데이터를 통해서 평균적으로 10%포인트 정도 저하되는 경향을 보였다.

기존시스템과 유량이 동일한 상태에서 설계된 나선재킷부는 거의 균일하게 축열조 측벽 전체를 가열하는 구조이다. 따라서 유량을 상당히 줄이고 유로의 폭과 피치를 작게 하여 유속을 현재 수준으로 유지시키면 축열조 상하부의 온도차를 10℃ 이상으로 크게 할 수 있으며 이를 통해 성층화를 촉진시킬 수 있다. 사실 나선재킷형 축열조는 가열된 물이 직접 축열조로 유입되는 구조가 아니기 때문에 유입시의 혼합을 억제할 수 있어 오히려 성층화 유지에 유리한 측면도 있다.

따라서 최적설계된 기존의 열교환기가 있는 강제순환형의 성능과 비교했을 때 집열효율 면에서는 대등한, 성층화 촉진으로 태양열의존도 면에서는 오히려 상회하는 시스템이 가능할 것으로 예상되고, 현재 이를 위한 설계로서 CFD 및 EES를 통해 해석 중이며 이를 토대로 제작된 축열조를 사용하여 검증실험 중이다.

4. 결 론

앞서 검토한 바와 같이 온수급탕 시스템의 규모와 설치지역에 따라 적합한 시스템이 달라지며, 특히 혹한기가 있는 기상조건 하에서의 시스템 선정은 신중해야 한다. 열교환기가 있는 강제순환형은, 관리자가 없는 일반가정에 소형시스템으로 보급되는 경우 유지관리가 복잡하고 고장시 능동적인 대처가 어려우며, 초기비용도 적지 않아 그다지 적합한 시스템으로 보기는 어렵다.

(1) 집열기 4장 전후의 소형 시스템에는 단순한 구조로 고장 가능성이 적고 유지관리가 용이한 시스템이 선정되어야 한다. 배관구조가 간단하고 순환펌프가 1대인 열교환코일 내장형 강제순환방식 혹은 저자들에 의해서 제시되고 검증된 나선재킷형이 적합하다.

(2) 남부 지방의 일부 지역은 이미 아열대 기후에 접근한 상태로서 열교환코일이 내장된 소형 자연순환형도 사용 가능하다. 다만 동파방지로 열선방식이 아닌 FPV방식이 안전성, 경제성 면에서 바람직하다.

(3) 중형 시스템에는 열교환코일 내장형은 충분한 열전달 면적의 확보가 어렵기 때문에 그다지 적합하지 않으며, 열교환기가 있는 강제순환방식이 무난하다. 향후 나선재킷형 축열조를 적용할 수 있는 한계용량에 대한 연구를 통해 중형시스템의 적용가능한 범위를 제시할 예정이다.

(4) 대형 온수급탕 시스템에는 전형적인 열교환기가 있는 강제순환형이 적합하다. 시스템의 안정화를 위해 부가적인 장치가 포함되어도 시스템 전체 비용에 비해 그다지 부담이 되지 않는다.

(5) 중대형 시스템으로, 남부 지방에서는 본 연

구에서 제안한 FPV와 열교환기가 없는 밀폐형 강제순환식의 적용도 가능하나, 본격적인 적용 전에 실증실험을 통한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Hong, H., 2004, 3% Use of Alternative Energy in 2006 and Solar Thermal System, Journal of SAREK, Vol. 33, No. 11, pp. 47-54.
2. Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes 2nd ed., John Wiley and Sons, p. 488.
3. Kim, Y. H., 2007, The dynamic of freeze, Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference, pp. 503-509.
4. Shah, L. J., Morrison, G. L. and Behnia, M., 1999, Characteristics of mantle heat exchangers for solar water heaters, Solar Energy, Vol. 67, pp. 79-91.
5. Kim, J. H., Choi, B. S., Hong, H. and Kim, Y.-S., 2005, Experimental verification for a spiral-jacketed storage tank applied to solar thermal system, Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 341-346.
6. Choi, B. S., Kim, J. H., Kang, Y. T. and Hong, H., 2004, Verification experiment and analysis for 6 kW solar water heating system, Part 2 : Modelling and simulation, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 556-565.