

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 27, No. 4, 2007

태양열원 난방기의 수축열조 효율개선에 관한 연구

류남진*, 한유리**, 박윤철***

*(주) 강남(ocynus@hanmail.net), **제주대학교 기계공학과(chujac@cheju.ac.kr),
***제주대학교 기계에너지시스템공학부(ycpark@cheju.ac.kr)

The Study on Efficiency Improvement of a Thermal Storage Tank for Solar Combined Heating System

Ryu, Nam-Jin*, Han, Yury**, Park, Youn Cheol***

*Kangnam CO., LTD. (ocynus@hanmail.net),

**Department of Mechanical Engineering, Cheju National University (chujac@cheju.ac.kr),

***Faculty of Mechanical Energy and System Engineering, Cheju National University (ycpark@cheju.ac.kr)

Abstract

This study is conducted to improve the efficiency of a thermal storage tank. The thermal storage tank was designed to store heat energy that obtained from the solar or the others heat sources. However, it has difficulties in storing heat with nonuniform temperature through the entire tank with respect to the vertical direction. This study is focused on the thermal stratification to improve thermal comfort for the resident in house. To enhance temperature stratification of the tank, a distributor was designed and installed in the middle of the storage tank vertically.

The vertically designed distributor could supply the return water with stratified temperature in the storage tank with respect to the height. The water velocity from the distributor hole is the same with the other outlet in the distributor. However, gravity effect on the flow in the storage tank is much higher than that of the velocity effect due to that Froude Number is less than 1.

During the heat charging process in the storage tank, temperature maintained with little difference with respect to the height. However the charging process takes long time to get a effective temperature for the heating or hot water supply because of all of water in the storage tank needs to be heated.

Keywords : Thermal storage tank(축열조), Degree of stratification(성층도), Discharging mode(방열운전), Charging mode(축열운전)

접수일자 : 2007년 9월 18일, 심사완료일자: 2007년 11월 23일

교신저자 : 박윤철(ycpark@cheju.ac.kr)

1. 서 론

우리나라는 불안정한 국제유가와 에너지환경문제에 대한 대응으로 신재생에너지에 관한 연구가 활발히 진행되고 있을 뿐만 아니라 실용·보급화에도 힘쓰고 있다. 그러나 대부분의 신재생에너지는 에너지의 수요와 공급이 일치하지 않기 때문에 생산된 에너지를 사용하기 전까지 일시적으로 저장하는 매체가 필요하다. 특히 태양열을 이용하는 에너지시스템의 경우에는 태양이 비치는 낮과 일사를 받을 수 없는 밤이 있어 에너지의 수요와 공급이 시간적으로 일치하지 않기 때문에 축열조의 설치가 필수적이다. 축열조는 태양으로부터 획득한 에너지를 열에너지 형태로 저장한 후 이를 필요로 할 때마다 쓸 수 있게 하여 열에너지의 수요와 공급에 따른 제약을 줄일 수 있는 장치이다.

축열조에 있어서 에너지를 효율적으로 이용하기 위해서는 축열조 내부의 물 온도가 성층화되어야 한다. 축열조 내의 유체의 온도가 높아지면서 성층화되면 높은 온도의 유체를 부하에 대응하여 우선적으로 공급하고 부하가 클 경우에는 축열조 하부의 낮은 온도의 유체를 보조열원을 사용하여 필요한 온도까지 올려서 부하에 공급할 수 있다. 따라서 축열조 내 유체의 온도 성층화는 축열에너지를 효율적으로 이용할 수 있는 방안 중의 하나이다.

축열조의 이용효율을 개선하기 위한 유체의 성층화에 대한 연구는 1980년대부터 꾸준히 진행되었다. 축열조와 분배기에 관련하여 Musser 등⁽¹⁾은 기존에 발표된 연구결과를 분류하여 몇 가지의 연구는 분배기의 설계이론 및 축열조의 용량에 관한 연구이며, 분배기의 설계에 있어서도 축열조 크기와 분배기의 상관관계는 검토되지 않았다고 보고하였다. 또한 분배기의 효율에 대하여도 분배기를 통과하는 유체유량을 변수로 하는 축열조내의 열전달현상에 관한 연구라고 하였다.

Cung 등⁽²⁻⁴⁾은 축열조의 열전달에 관한 연구에서 축열조내의 온도성층화를 저해하는 가장 중요

한 요인은 외부에서 축열조 내로 들어오는 유체에 의한 혼합이라고 하였다. Nakos 등⁽⁵⁻⁷⁾은 축열조에 유입되는 유체와 축열조내의 유체의 혼합은 유입되는 유체의 유량 및 두 유체의 온도차에 따라 달라지며, 이 현상을 해석하기 위해서 고려하여야 할 변수는 분배기 입구의 프라우드수(Froude number)와 레이놀즈수(Reynolds number)이며, 축열조 내부의 중력에 의한 유동도 영향을 미친다고 발표하였다.

형상에 관한 연구로써 Park⁽⁸⁾은 다공성 분배기의 축열성능은 유동율이 일정할 때 분배기의 출구지름이 감소할수록 효율이 증가하며, 직경이 일정할 경우에는 유입되는 유체온도와 축열조내의 유체의 온도차가 클수록 효율이 증가한다고 하였다.

본 연구에서는 축열조로 유입되는 유체를 축열조 내부에서 혼합시키는 것보다 성층화를 이루는 것이 부하에 대응하여 신속하게 난방열량을 공급하는 방안임을 고려하여 축열조에 유입되는 유체의 흐름을 분배기(diffuser)를 사용하여 제어하였다. 본 연구의 분배기는 부하가 발생하였을 때 축열조 내부에서 가장 먼저 공급되는 유체의 온도를 상승시킬 수 있는 구조이며, 그림 1은 이를 위한 분배기의 설계도이다. 기존의 분배기가 수평으로 축열조 내부에 설치된 것에 비하여 본 연구에서는 그림 1과 같이 분배기를 수직으로 설치하였으며, 분배기를 태양열 이용 난방시스템에 적용하여 그 축열성능과 방열성능을 평가하였다.

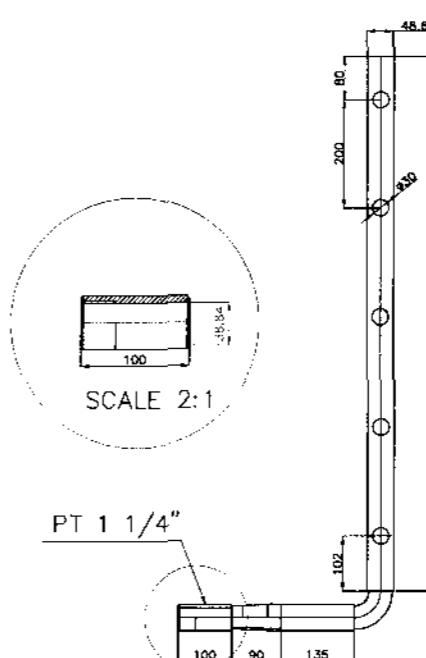


그림 1. Schematic of a distributor nozzle

2. 축열조 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 제작한 축열조는 **그림 2**와 같다. **그림 2의 (a)**는 온도성충화를 이용하지 않고 보급된 기존축열조의 단면도이며, **(b)**는 본 연구에서 개발한 수직으로 설치된 분배기를 구비한 축열조이다.

축열조의 체적용량은 0.9 m^3 이며, 분배기의 지름은 100 mm , 분배기의 환수배출 구멍과 구멍사이의 간격은 200 mm 이고 전체길이는 $1,400 \text{ mm}$ 이다. 축열조 내 유체의 온도측정을 위하여 수직방향으로 4개의 구간을 나누어 T-type의 열전대를 사용하여 각 지점의 온도를 측정하였으며, 유량은 체적유량계를 사용하였으며 모든 측정값은 자료처리시스템을 통하여 기록하였다.

본 연구에서 구성한 분배기는 **그림 3**에 나타낸 바와 같이 환수되는 유체의 온도를 측정하여 축열조에 있는 유체의 온도와 유사한 층으로 환수유체가 공급될 수 있도록 제작하였다. **그림 3**에서 ρ 는 밀도를 나타내며, 환수되는 유체의 온도에 따른

밀도차를 이용하기 위하여 분배기를 수직으로 설치하여 본 연구에서 선정한 태양열집열기의 집열면적은 30 m^2 이고 최대일사량 조건에서 약 30 kW 의 열량을 생산할 수 있는 집열기이다. 따라서 집열기에서 생산된 태양에너지의 80% 를 축열조에 공급할 수 있다고 가정하여 약 24 kW 의 에너지를 축열조에 전달할 수 있는 열교환기를 축열조에 설치하였다.

본 연구에서 축열조에서 부하측으로 공급하는 유체의 유량은 **그림 4**와 같이 축열조의 축열시험을 통하여 결정하였다. 축열실험은 유체의 유량을 변화시키면서 축열조의 평균온도를 측정하여 축열량을 계산하였으며, **그림 4**에서 축열열량이 24 kW 일 때 유체의 유량은 약 10 kg/min 으로써 이 값을 본 연구에서 설계유량으로 설정하였다.

즉, 축열조에서 부하에 공급된 고온유체가 부하가 작을 경우에는 열량을 적게 사용하고 어느 정도의 고온을 유지한 채로 축열조로 환수된다. 이 때 축열조 하단의 유체온도는 축열조 상단보다 상

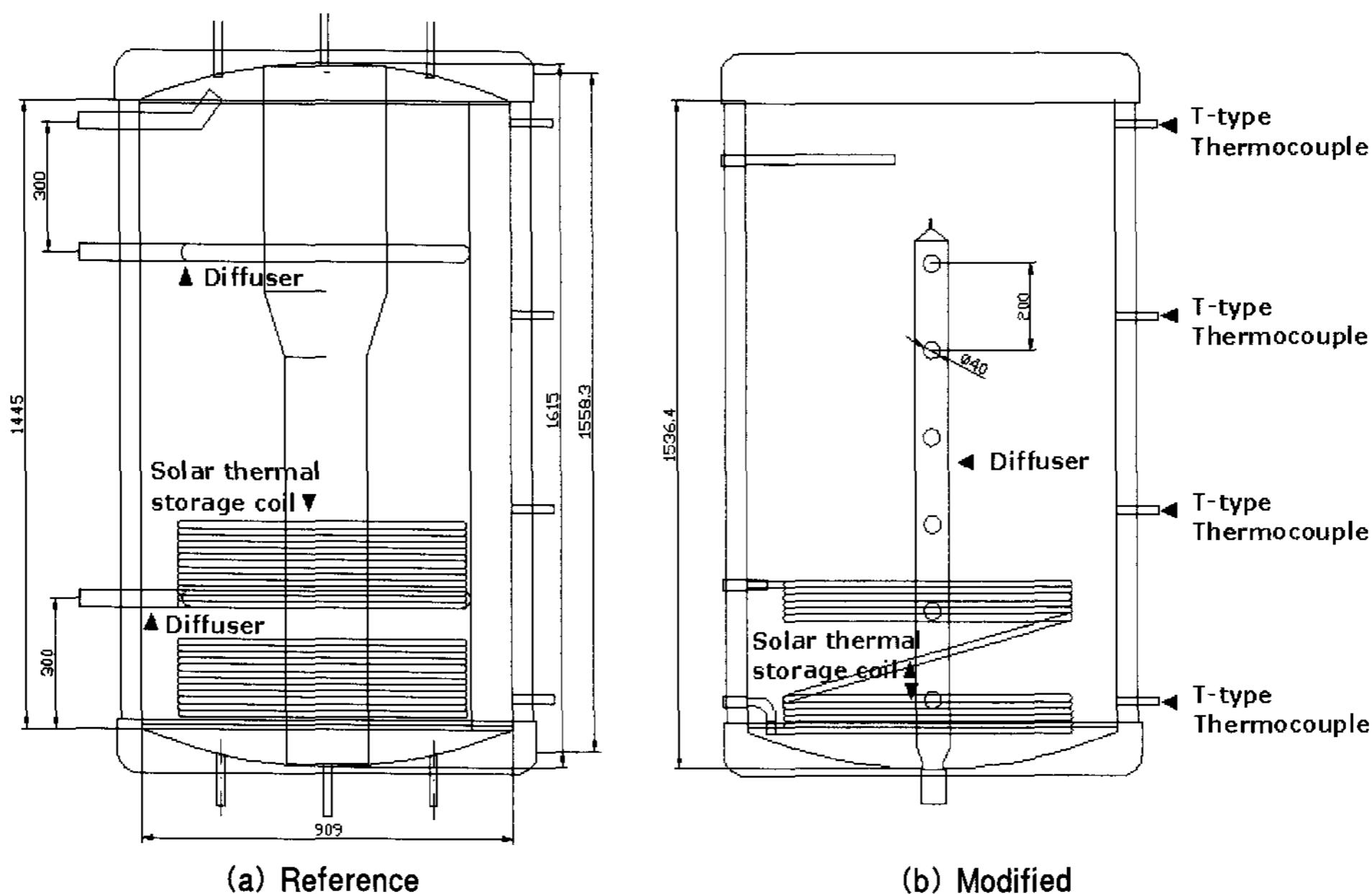
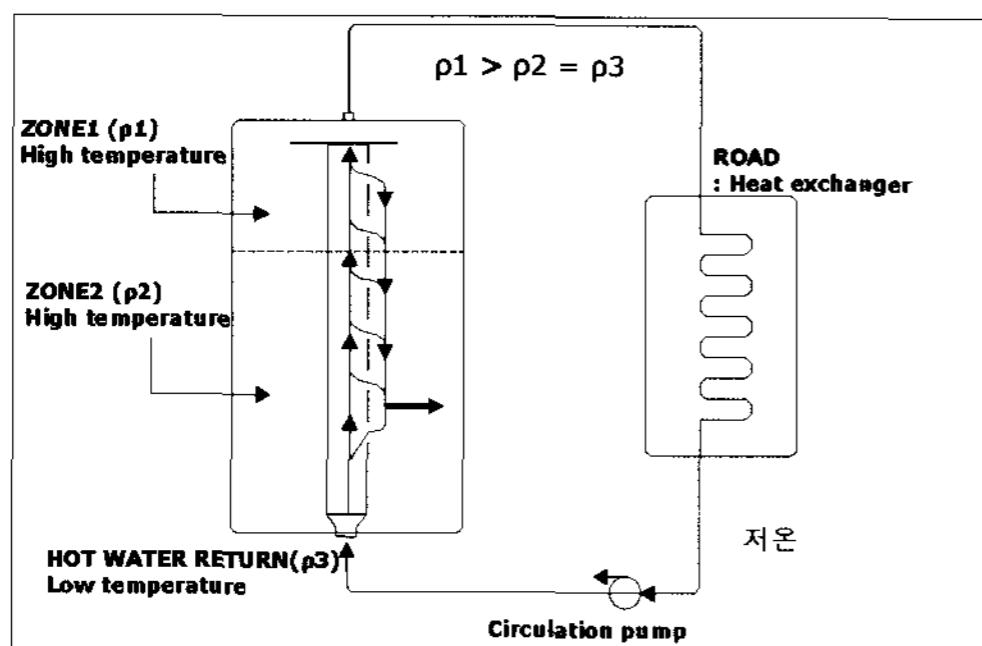
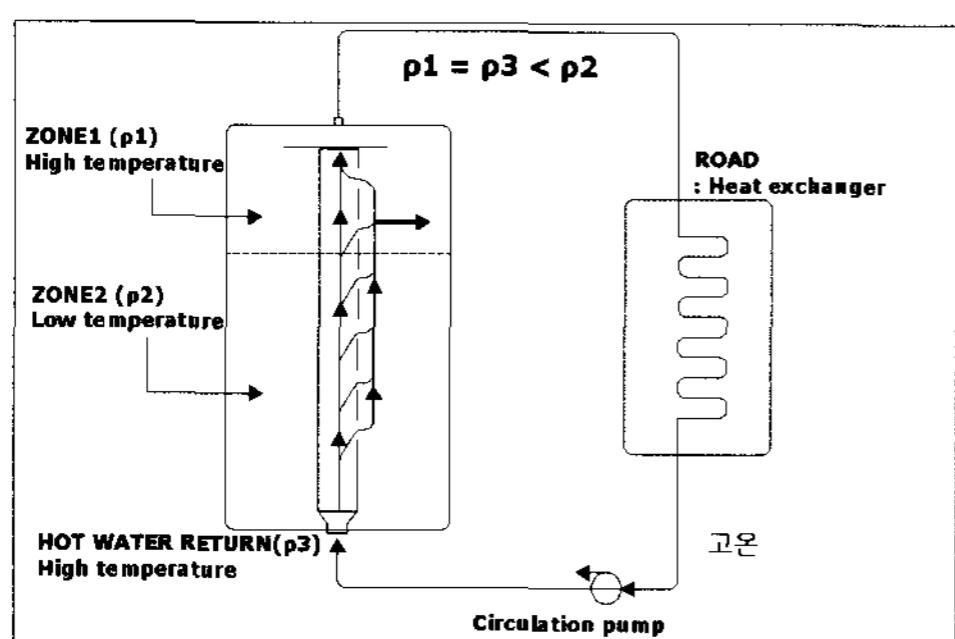


그림 2. Schematic diagram of storage tanks.

대적으로 낮기 때문에 환수유체는 밀도가 높은 하단에 머무르지 않고 분배기를 따라 수직으로 이동하여 환수유체와 가장 근접한 온도를 나타내는 축열조 상단에서 기존의 유체와 혼합된다.



(a) Return water at high temperature



(b) Return water at low temperature

그림 3. Schematics of return working fluid distribution in the storage tank.

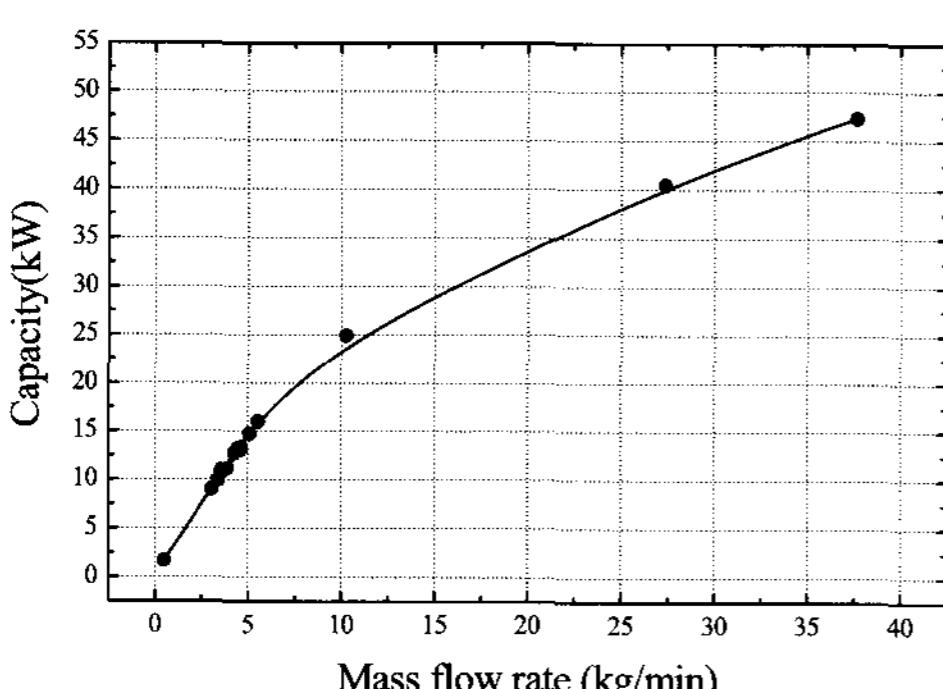


그림 4. Capacity of the storage tank with variation of water flow rate.

반면에 부하가 클 경우에는 환수유체의 온도가 낮아지게 되고, 온도가 낮은 유체는 분배기에서 축열조로 토출된 후 분배기의 벽을 타고 하단으로 이동하여 직접 부하에 공급되는 상단의 유체온도를 떨어뜨리지 않게 된다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구를 통해서 제작한 실험장치를 이용하여 축열조의 방열성능과 축열성능을 측정하였다.

3.1 방열성능평가

그림 6는 축열조에서 분배기가 수평으로 설치되었을 경우에 대한 축열조 유체의 시간의 변화에 따른 온도분포를 나타내고 있으며, 이때 각각의 그래프의 측정 시간간격은 30분이다.

축열조의 온도가 75°C에서 35°C까지 떨어지기까지 약 7시간 30분정도 방열 운전되었고, 부하에 열량이 공급되면 축열조의 최상부 뿐만 아니라 모든 위치에서 유체의 온도가 거의 같으며, 시간이 지남에 따라 축열조의 평균온도 감소로 부하에 대한 열량공급이 줄어들면서 온도 강하율도 낮아진다.

축열조에서 온도분포의 균등화가 필요한 시스템 구조는 축열조의 용량이 작고, 부하에 공급되는 유체가 사용된 후 배수되며, 배수된 만큼 유체가 시수로 공급되어 팽창탱크가 없는 압상식 온수기에서 적절한 구조이다. 하지만 팽창탱크가 설치된 개방형의 순환구조와 축열조내의 열매체를 부하에 공급한 후 다시 축열조로 재순환시키면서 난방을 하는 폐순환 구조의 난방장치에서는 적합하지 않은 구조이다.

본 연구에서는 온수기가 아닌 난방용으로 사용되는 축열조에 있어서 분배기의 구조를 수직으로 설치하였을 경우에 대한 축열조의 시간의 경과에 따른 온도변화는 그림 6에 나타내었다. 그림 5와 마찬가지로 그래프 하나의 시간간격은 13분이다. 운전 초기에는 약 70°C의 고온의 유체가 축열조의

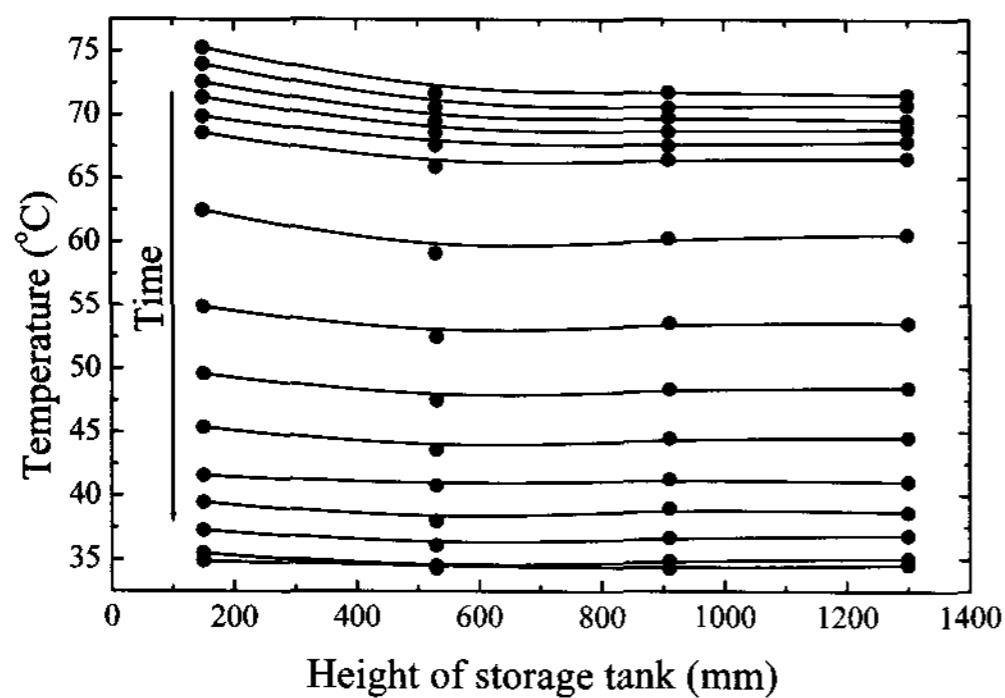


그림 5. Temperature variation with time during heat discharging process of a horizontally installed distributor.

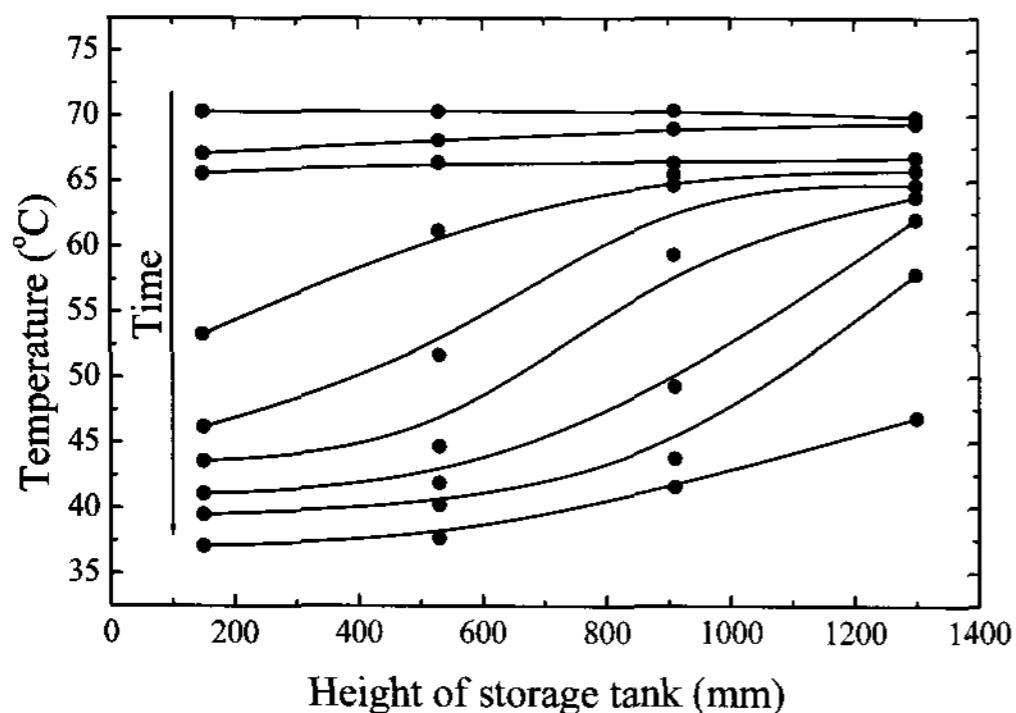


그림 6. Stratification of temperature of the working fluid with respect to height in a vertically installed distributor.

높이에 대하여 같은 온도로 유지되며 약 66°C까지는 높이에 따른 변화 없이 거의 일정하게 감소한다. 이때의 온도강하는 축열조에서 외기로의 열손실에 의한 온도강하이다. 이후에 시스템이 운전되기 시작하여 유동이 발생하면 축열조 상부의 고온의 열매체가 부하에 수송되어 열을 공급한 후 저온의 유체로 축열조에 환수하게 되므로 축열조 하부의 온도가 급격하게 감소하여 축열조상부와 하부의 온도차가 매우 커지게 된다. 따라서 축열조의 수직방향에 대하여 온도의 성층화가 이루어진다는 것을 알 수 있다. 시간이 지남에 따라 축열조의 각 높이에서 평균온도가 온도가 떨어지고 축열조상단과 하단의 온도차이는 차츰 줄어들게 된다. 축열조 성층화를 정량적으로 평가하기 위하여

축열조의 분배기에서 레이놀즈수와 프라우드수를 구해보면 유량의 변화가 무차원 변수에 가장 큰 영향을 미친다. 레이놀즈수를 변화시키기 위하여 유량을 10 kg/min, 23 kg/min 및 27 kg/min으로 변화 시켰으며, 이를 무차원수로 만들기 위해 유속으로 변화시키면, 각각 0.04 m/s, 0.10 m/s 및 0.12 m/s가 된다.

수조형태의 공간에서의 프라우드수는 식 (1)로부터 계산할 수 있다.

$$Fr = \frac{v^2}{gL} \quad (1)$$

여기서, $v [m/s]$ 는 유속을 나타내며, $L [m]$ 은 축열조내의 온도 측정지점까지의 수직높이이다.

그림 7은 축열조 형상과 분배기에서 유체의 속도를 기준으로 계산된 레이놀즈수와 프라우드수를 나타내고 있다. 레이놀즈수는 축열조의 높이에 따른 차이를 나타내지 않으며, 프라우드수는 높이가 낮은 경우에 작은 값을 가지고 있으며, 유속이 빨라질수록 증가한다. 축열조에서 프라우드수는 1보다 작으며, 유체의 밀도차이에 의한 중력의 영향이 속도에 의한 유동보다 커다는 것을 알 수 있다. 높이에 따른 프라우드수는 상단에서 보다 작은 값을 가지고 있다. 높이가 낮을수록 속도에 의한 영향이 커지는 것을 알 수 있다.

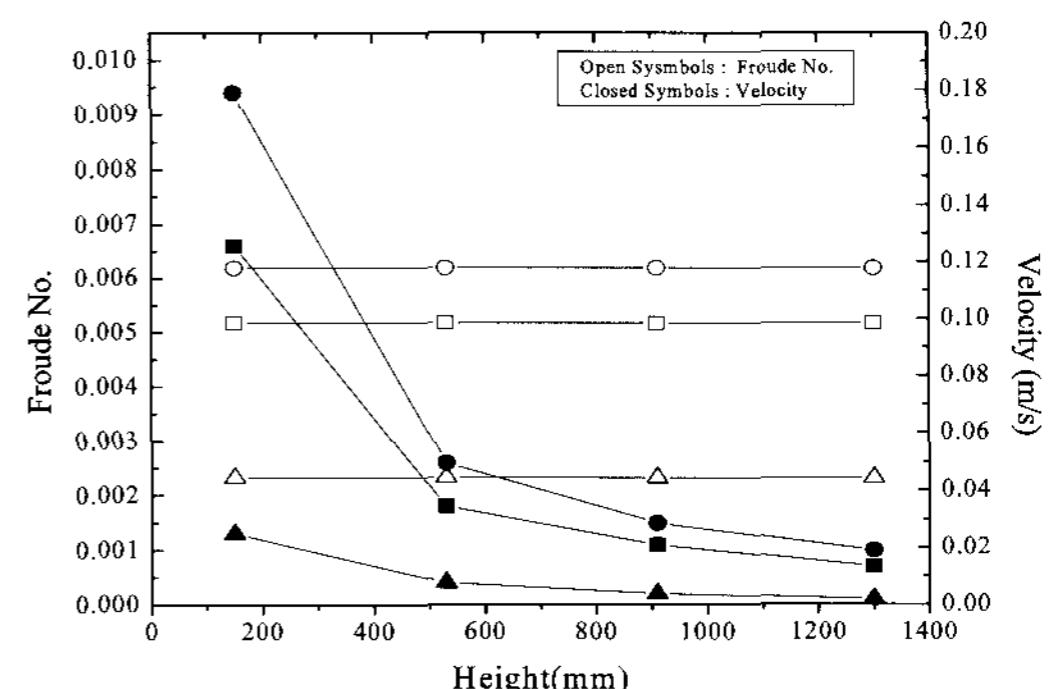


그림 7. Froude number and face velocity of working fluid with respect to height of the storage tank.

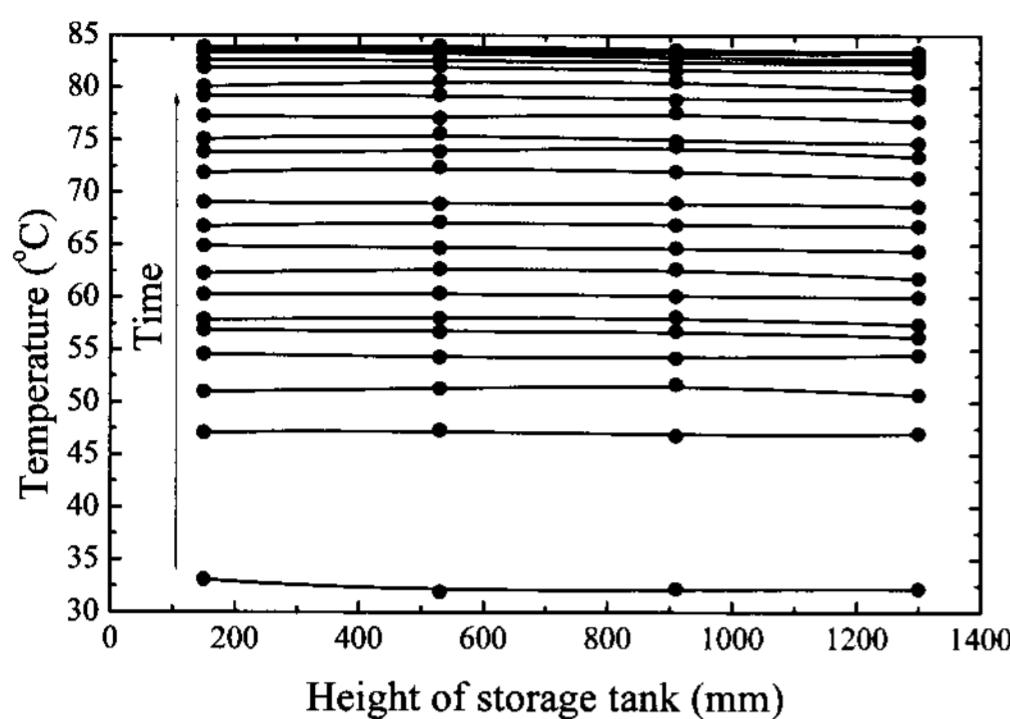


그림 8. Temperature increment during heat storage mode.

따라서 축열조가 부하에 대하여 신속하게 대응하기 위한 방안으로 개선한 분배기에 있어서, 분배기에서 토출되는 유체의 유속을 위와 같이 프라우드수가 1이하가 되도록 하여야 성층화를 이룰 수 있다는 것을 알 수 있다.

본 연구와 같이 온수급탕 및 난방시스템에 사용되는 축열조는 부하에 난방열을 공급하는 방열운전시의 성능뿐만 아니라 축열조에 열을 저장하는 축열운전 성능도 중요한 인자이다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 축열조의 하단에 설치된 축열열교환기를 통하여 태양열 집열기에서 흡수한 태양에너지를 축열조에 축열하는 실험을 수행하였다.

3.2 축열성능평가

축열조의 축열운전 특성을 살펴보면 그림 8과 같다. 그래프의 하나의 간격은 50분이며, 총 실험 시간은 약 17시간이다. 일사량이 많을 때는 축열조에 공급되는 유체의 온도가 높지만 축열조의 온도가 높아지면서 축열조의 온도증가폭이 감소하게 된다. 이는 축열조의 온도가 난방이 가능한 유효온도까지 도달하기 위해서는 상당히 긴 시간이 소요 된다는 것을 알 수 있으며, 축열시 탱크 내부의 온도변화패턴이 축열조의 수직방향에 대하여 동일한 온도로서 축열조 전체가 같은 온도로 축열이 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 축열조의 하단에 축열열교환기가 설치되었기 때문이

다. 이를 해결하기 위하여 축열열교환기를 상부에 설치할 경우에는 고온의 유체가 축열조 상부에 머무르고 열확산을 통해서만 열이 전달되기 때문에 축열조의 온도상승이 매우 늦어지지만 고온의 유체를 부하에 대응하여 공급할 수 있는 특성이 있다. 하지만 이 경우에는 태양열시스템의 집열기를 효율적으로 사용할 수 없는 문제점이 있다.

4. 결 론

일반적으로 태양열을 열원으로 사용하는 태양열온수급탕 및 난방기에 있어서 대용량의 축열조는 축열조내부의 열매체 온도가 유효온도가 되어야 부하에 열량을 공급하는 구조이다. 본 연구에서는 축열조의 전체온도가 유효온도가 되지 않더라도 부하가 필요로 하는 온도의 열량을 신속하게 공급할 수 있는 구조로 분배기를 수직방향으로 개선하여 성능실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 난방에너지를 부하에 공급한 후 축열조로 환수되는 열매체가 축열조의 하단에 수평방향으로 설치된 분배기를 통하여 축열조에 환수 될 경우에는 축열조의 높이에 따른 온도차가 크게 나타나지 않는다. 그러나 분배기를 축열조의 하단에서 상단으로 수직방향으로 설치할 경우에는 부력의 영향으로 고온의 유체는 축열조의 상단으로 공급되고 온도가 낮은 저온의 유체는 축열조의 하단으로 공급되어 축열조의 온도성층화를 달성 할 수 있다.
- (2) 본 연구를 통하여 개선된 수직형 분배기에서 축열조의 높이에 따른 축열조로 환수되는 유체의 유량 차이는 없으며, 밀도차에 의한 온도의 성층화로 인하여 축열조의 상단에서 중력에 의한 유동이 분배기에서의 속도에 의한 유동보다 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 축열조 분배기의 유속을 제어함으로써 축열조의 온도성층화

화를 이룰 수 있다는 것을 알 수 있다.

- (3) 축열조의 축열상태를 검토한 결과 축열시 온도상승은 축열조의 높이에 따라서는 큰 변화가 없으며, 단지 시간에 따라서 전체온도가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 축열조의 방열성능과 더불어 축열성능을 향상시키기 위해서는 축열조 내부에 설치되는 축열열교환기의 재설계가 동반되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 2006년 에너지관리공단 신재생에너지 기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. A. Musser, W. P. Bahnfleth, 2001, Parametric study of charging inlet diffuser performance in stratified chilled water storage tank with radial diffuser : part 1-Model development and validation, Journal of HVAC&R Research, Vol. 7, No. 1, pp. 31-49.
2. Jae Dong Chung, Joohyuk Park, Sung-hwan Cho, 2004, Effect of diffuser shape on the performance of water-chilld heat storage, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 374-382.
3. Young-soo Lee, Sang-nam Lee, Jong-ryul Kim, 2005, Effect on stratification due to diffuser shape in a thermal storage tank, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 11, pp. 990-997.
4. Wildin, M., 1990, Diffuser design for naturally stratified thermal storage, ASHRAE Transaction, 96(1), pp. 1094-1102.
5. Nakos, J., 1987, Prediction of velocity and temperature profiles in thermally driven gravity currents applied to stratified thermal storage tank, Ph. D. Dissertation, University of New Mexico, New Mexico.
6. Lin, T. Y., Shey, R. J. and Fang, L. J., 1987, A study of thermal stratification in storage tank whit charging, Journal of the chinese society of mechanical engineers, Vol. 8, No. 2, pp. 87-94.
7. Yoo, J. 1986, An investigation of reynolds number effects in thermally driven gravity currents applied to thermal storage tanks, Ph. D. Dissertation, University of New Mexico, New Mexico.
8. Ee-Tong Park, Sung-Il Hwang, Young-Il Choi, 1989, Experimental study on the thermal storage efficiency through variable porous manifolds in a test storage tank, Solar energy, Vol. 9, No. 3, pp. 37-43.