태양열 콤비시스템의 축열조에 적용되는 분배기의 효과

The Effect of a Manifold in a Storage Tank Applied to a Solar Combisystem

손호석(Hyo Seok Son)¹, 홍희기(Hiki Hong)^{2*}

¹경희대학교 기계공학과 대학원, ²경희대학교 기계공학과

¹Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea

(Received December 2, 2013; revision received April 30, 2014; Accepted: May 12, 2014)

Abstract Return piping is used in a solar combi-system for heating and hot water supply. When the temperature of the lower side of a storage tank is low due to hot water usage, the returned hot water after heating is mixed with the lower side cold water of the tank, and the useful energy is reduced. We studied the degree of thermal stratification in the tank, using either a diffuser or a manifold to prevent mixing. Using the diffuser, mixing starts from the bottom of the storage tank. On the other hand, the manifold has the marked effect of preventing mixing. As a result of experiments with changing the diameter and number of holes in the manifold, the optimum condition is 8.5 mm diameter and 96 holes, under the condition of 0.3 lpm.

Key words Solar combisystem(태양열 콤비시스템), Stratification(성층화), Thermal energy storage(열에너지 저장), Manifold(매니폴드), Diffuser(디퓨저)

* Corresponding author, E-mail: hhong@khu.ac.kr

1. 서 론

변환형태가 열에너지인 태양열 시스템은 경제성 및 활용도가 높아 신재생에너지 분야에서도 가장 경쟁력을 갖춘 분야의 하나로 평가되며⁽¹⁾ 더욱 높은 효율의 시스템 개발을 위해 지속적인 연구가 진행되고 있다. 태양열 시스템의 효율향상은 주요 구성요소인 집열기의 성능향상과 더불어 축열조, 시스템제어 등에 의해 달성될 수 있다. 그동안 축열조 내의 상·하부 온도차를 크게 하는 성층화촉진기술을 적용하여 태양열의 온도를 및 유용에너지의 증대가 가능하다는 것은 이론적, 실험적으로 증명되었다.^(2,3) 기존의 연구에서 열성층 파괴인자는 입구 부근에서의 유체혼합, 불완전한 단열에 의한 열손실, 용기벽면을 통한 열전도, 유체 내의 열확산 등으로 알려져 있다.⁽⁴⁻⁷⁾ 그 중에서 환수배관 입구에서의 유체혼합은 가장 주된 성층화 파괴인자로, 성층화 유지를 위해서는 초기 혼합을 최소화시키는 적절한 성층화 유지기구가 필요하다.

여러 종류의 태양열 시스템 가운데, 축열조 내의 물이 집열기에서 가열된 후 상부로 유입되는 Fig. 1(a)의 직접순환형 태양열 시스템에서는 초기 혼합을 막기 위해 디퓨저(diffuser) 혹은 분배기(manifold or distributor)

와 같은 성층화 촉진기구를 사용한다.⁽⁸⁻¹²⁾ 특히 Hong and Kim⁽⁹⁾이 제안한 분배기는 집열기에서 가열된 온수가 축열조 내의 같은 온도영역에 유입되어 완전성층화에 상당히 효과적임을 보인 바 있다. 이와 같은 방식은 열획득 및 유효에너지 증대 측면에서 유리하나 동절기가 있는 우리나라의 기후 특성상 동파에 취약하여 그다지 적합하지 않다. 동파의 위험에서 안전하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 실외측 배관과 집열기에는 부동액을 순환시키며 열교환기를 거쳐 축열조 내부의 물을 가열하게 되는데, 열전달촉진을 위해서는 순환유량이 커지고 이로 인해 축열조에 유입되는 물의 유속이 커져 성층화촉진기구 특히 분배기의 효용성이 떨어져 실제로는 거의 사용되지 않는다.

강제순환형 태양열 시스템은 과거 급탕 전용에서 냉·난방 연계 시스템의 등장으로 활용도를 높이고 있다. Fig. 1(c)의 콤비시스템처럼 환수배관이 존재하는 시스템의 경우 집열운전뿐만 아니라 난방운전 동안 혼합을 최소화하는 것이 중요하다. 특히 급탕부하가 걸려 축열조 하부로 낮은 온도의 시수가 유입되어 축열조 하부온도가 낮을 때 난방으로부터 환수되는 온수와의 혼합을 최소화시켜 열성층을 최대한 잘 유지시켜야 한다. 즉 성층화를 장시간 유지하기 위해서는 환수되는 유체

Fig. 1 Active solar thermal systems.

Fig. 2 Schematic of experiment system.

가 축열조 내의 같은 온도영역으로 정확하게 유입되어야 하며 현재 널리 사용되는 디퓨저를 통해 이와 같은 역할을 수행하는 것은 어렵다.

본 연구에서는 환수되는 유체가 같은 온도 영역으로 유입될 수 있게 유도해 주는 분배기의 적용에 대한 연구를 수행하였으며, 최적의 분배기 직경과 구멍개수를 제시하고 또한 유량에 따른 영향을 분석하도록 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험은 Fig. 1(c)와 같이 부하측으로 공급된 유체가 온수매트를 순환한 후 축열조로 환수되는 시스템을 상정하여, Fig. 2와 같이 간략히 구성하여 수행하였다. 펌프 출구에 볼밸브를 설치하여 개도조절로 유량을 변경할 수 있도록 하였으며 축열조 환수 직전에 유량계를 설치하여 유입되는 유량을 측정하였다. 축열조로 유입되는 유체의 온도는 실제 온수매트를 사용할 경우, 온기를 느낄 수 있는 55°C 로 유입되도록 항온수조를 이용하여 설정하였다. 실제 축열조 대신 아크릴 축열조 ($\phi 300 \times 1500$)를 제작하였다. 높이 방향으로 150 mm 간격으로 K-type 열전대를 설치하여 각 구간별 온도를 측정하였다. Fig. 3과 같이 성층화 유지기구로 디퓨저 (직경 80 mm , 높이 10 mm 의 디스크형)와 분배기를 사용하였으며, 분배기는 가공의 편의를 위해 우레탄 튜브를 사용하며 내경과 구멍($\phi 3\text{ mm}$)의 수, 즉 공극률을 변화시켜 제작하였다.

2.2 실험방법

높이 1.5 m 인 축열조에서 하부로부터 0.9 m 까지, 즉

Fig. 3 Manifold and diffuser used in experiment.

하부 60%를 약 16℃, 상부 40%를 60℃ 정도로 성층화 시킨 후 55℃의 물을 하부로 유입하였으며, 60분간 10 초 간격으로 온도변화를 계측하였다. 디퓨저와 분배기에 대해 각각 실험을 진행하여 60분 후의 성층화 유지에 대해 비교하였다. 현재 시판되고 있는 온수매트에서 주로 사용하고 있는 유량 0.3 lpm를 기준으로, Table 1과 같이 분배기 내경과 구멍개수에 대해 각각 3수준으로 2회 반복실험을 수행하였다. 결과분석을 통해 얻어진 최적조건의 분배기에 대해 유량을 변화시켜 가며 추가 실험을 수행하였으며 어느 정도 범위의 유량에서 안정적으로 사용할 수 있는지도 확인하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 디퓨저와 분배기의 비교

Fig. 4(a)는 디퓨저, (b)는 30개의 구멍을 뚫은 내경 8 mm의 분배기에 대한 실험 결과이다. 동일한 유량 (0.3 lpm)으로 실험을 진행하였으며 15분 간격으로 축열조 내부의 온도변화를 그래프로 나타내었다. 디퓨저의 경우 초기에 0.9 m 부근에서 극명한 성층화를 유지하고 있으나 60분 경과 후 저온부의 온도가 10℃ 정도 상승하면서 1.2 m까지 혼합이 진행되는 것을 알 수 있다. 유입된 55℃의 온수가 하부에서부터 완전히 혼합되어, 완전혼합형 축열조의 패턴과 유사해진다. 반면에 분배기 실험 결과 60분 경과 후에도 상부의 온도는 상당히 높은 온도를 유지하며 하부의 온도는 거의 상승하지 않았다. Fig. 5와 Fig. 6에 디퓨저와 분배기 실험에 대한 각각의 가시화 사진과 열화상 카메라 이미지를 보였는데 방사를 보정을 하지 않았기 때문에 실제온도

(a) diffuser

(b) distributor

Fig. 4 Temperature distribution for diffuser and distributor.

Fig. 5 Temperature distribution in the diffuser thermal storage tank.

Fig. 6 Temperature distribution in the distributor thermal storage tank.

값과는 다소 차이가 있으나 분배기 쪽의 성층화 유지가 확연히 우수함을 알 수 있다. 유동가시화 사진으로부터 디퓨저가 하부부터 혼합이 이루어지는데 반해 분배기에서는 대부분의 유체가 고온부와 저온부의 경계인 0.9 m 위에서 빠져나오며 상대적으로 저온인 하부에서 유출되는 유체는 거의 없음을 확인할 수 있다. 분배기의 특징인 상부에서 유입된 유체가 밀도차로 인해 비슷한 온도영역으로 빠져나오는 현상이, 하부에서 유입되어도 동일함을 보였다. 하부의 온도가 다소 상승한 요인은 분배기와 축열조 내 유체 사이의 열전달 효과와 미세하게 흘러나온 유체로 인한 것으로 판단된다.

성층화 유지 정도를 표현하는 방법은 다양하게 제시되었으나,⁽¹³⁾ Wu and Bannerot의 평균제곱편차법(mean square deviation method)에서 제안하는 성층화계수 ST 및 성층화비 R_{TS} 를 사용하여 평가하기로 한다.

$$ST = \frac{1}{m_{store}} \sum_{i=1}^N m_i [T_i - T_{avg}]^2 \quad (1)$$

$$R_{TS} = \frac{ST_t}{ST_i} \quad (2)$$

식(1)의 ST 는 성층화계수, m_{store} 는 저장소 내 매질의 질량, N 은 저장소를 수평층으로 나눈 간격의 수, i 는 저장소내 i 번째 수평층, T_i 는 i 번째 수평층의 온도, T_{avg} 는 저장소 내 열에너지의 질량 가중 평균 온도이며, 식(2)의 ST_t 는 t 시간 경과후, ST_i 는 초기의 성층화계수를 나타낸다.

성층화비 R_{TS} 가 1이면 완전성층을, 0이면 완전혼합을 의미한다. Fig. 7과 같이 디퓨저와 분배기 모두 성층화비가 1이었다가 분배기 쪽이 더 빠르게 성층화가 약화되며, 60분 경과후의 값은 디퓨저가 0.22, 분배기가 0.38로서 확연히 분배기가 성층화 유지에 유리함을 알 수 있다.

Fig. 7 Timewise variation for degree of stratification.

3.2 내경과 구멍개수에 따른 결과

상용화된 온수매트에서 주로 사용하는 순환유량에서 분배기의 설계를 위해 유량을 0.3 lpm으로 고정하고 적절한 분배기의 내경과 구멍개수를 찾는 실험을 수행하였다. 주어진 유량에서 분배기의 직경이 매우 크거나 작으면 분배기의 기능을 제대로 수행하지 못하는 것을 확인하였다. 즉 Fig. 8과 같이 직경이 지나치게 작으면 분배기 전체의 구멍에서 고르게 빠져나오는 경향을 보이며, 지나치게 크면 넓은 접촉면적으로 인해 유입되는 유체의 온도가 주변 축열조 내 온도로 빠르게 떨어져 같은 온도영역의 상부까지 올라

오기 전에 상당량이 도중에서 빠져나오게 된다. 예비 실험 결과 주로 사용하는 20~60℃의 온도대에서 0.3 lpm의 경우 분배기의 내경은 8 mm 전후임을 확인할 수 있었다. 따라서 직경을 6, 8, 12 mm, 1.5 m 높이의 분배기에 $\phi 3$ mm의 구멍개수를 30, 90, 160의 3수준으로 하여 이원배치법으로 2회씩 반복실험을 수행하였다.

Fig. 9에 축열조 내의 초기온도와 60분 경과 후의 온도분포를 보였다. 그래프만으로는 어느 조건이 보다 성층화에 유리한지 구분하기 어려우나 Fig. 9(c)의 직경 12 mm에서 하부의 온도상승폭이 상대적으로 큰 것은 Fig. 8(b)와 유사한 현상으로 설명할 수 있을 것이다. 분배기 내경과 구멍개수에 대한 성층화 영향을 정량적으로 분석하기 위해 성층화비(R_{TS})를 특성값으로 Table 1에 정리하였다. 분산분석 결과 실험조건 하에서 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 분배기의 직경은 유의한 것으로, 반면에 구멍의 개수는 유의하지 않은 것으로 나타났다. 최적의 조건은 직경 8.5 mm, 구멍의 수 96개일 때이며, 실험조건 8 mm와 구멍의 수 90개일 때 가장 근접하는 것으로 보인다. 하지만 예비실험을 통해 가능성 있는 범위로 실험의 조건을 좁혔기 때문에 구멍의 수는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났지만, 극단적으로 구멍의 수가 많거나 적으면 성층화 유지에 역시 영향을 줄 것으로 판단된다. 산출된 최적의 분배기 제원도 유량이 크게 달라지면 제 구실을 할 수 없으며, 실험 혹은 해석을 통해 찾아내야 할 것이다.

Fig. 8 Flow visualization for too small and large diameter of manifold.

(a) Inner diameter : 6 mm

(b) Inner diameter : 8 mm

(c) Inner diameter : 12 mm

Fig. 9 Temperature distribution according to diameter and number of holes.

Table 1 Degree of thermal stratification by mean square deviation method

		Degree of thermal stratification		
Inner diameter [mm]	Number of holes (ratio of hole area)	30 (0.59%)	90 (1.76%)	160 (3.13%)
	6	0.33 0.31	0.38 0.36	0.33 0.35
	8	0.39 0.40	0.41 0.41	0.42 0.34
	12	0.32 0.26	0.31 0.26	0.26 0.31

3.3 유량에 따른 영향

분배기 실험을 통해 환수배관이 존재하는 시스템에서 분배기가 성층화를 유지하는 데 효과가 있음을 확인할 수 있었고 최적의 조건이 존재함을 보였다. 이에 분배기 제원과 유량의 관계를 규명하기 위해 앞서 최적조건인 분배기 내경에서 유량을 변화시켜 실험을 수행하였다.

내경 8 mm, 30개의 구멍을 뚫은 분배기에 유량(0.2~0.7 lpm)을 변화시키면서 실험을 수행했으며, Fig. 10에 성층화비를 나타내었다. 0.2~0.4 lpm의 유량 범위에서는 거의 차이를 보이지 않다가, 0.5 lpm 이후부터는 성층화 유지 정도가 확연히 떨어지게 되며 앞서 예비실험에서 확인한 바와 같이 유량이 커지면서 고르게 빠져나오는 현상이 나타나면서 기능이 떨어지는 것으로 판단된다.

4. 결 론

태양열 축열조의 성층화 유지를 위한 분배기에 대한 실험을 진행하였다.

Fig. 10 Timewise variation for degree of stratification in variable flowrate.

실험결과 디퓨저보다 분배기를 이용할 경우보다 오랜 시간 성층화를 유지할 수 있고, 분배기의 내부와 축열조 사이의 압력평형을 유지하기 위한 적절한 직경과 구멍개수가 필요함을 확인하였다. 또한 분배기의 내경을 고정하고 유량변화에 대한 실험결과 내경에 따라 분배기의 역할을 유지할 수 있는 한계 유량이 존재함을 확인하였다. 축열조로 환수되는 유량이 0.3 lpm인 경우를 전제로 내경과 구멍개수를 변화시킨 실험결과 내경 8.5 mm, 구멍개수 96개에서 최적 반응값이 추정되었다. 하지만 유량이 달라지면 분배기의 기능이 떨어지므로 실험 혹은 해석을 통해 새로운 최적값을 찾아야 한다.

본 연구에서는 소규모 태양열 콤비시스템에서 국소 난방을 위한 온수매트의 사용을 전제로 적은 유량에서 적합한 분배기에 대해 실험을 진행하였다. 추후 실제 축열조에 분배기를 설치하여 실제상황을 전제로 한 분배기 효과 및 태양열 냉·난방 시스템 등 환수유량이 큰 경우에 적합한 분배기 설계에 관한 연구를 진행할 계획이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 에너지기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음(과제번호 : 2012T100100689).

References

1. Hong, H. K., 2004, 3% Use of alternative energy in 2006 and solar thermal system, Magazine of the SAREK, Vol. 33, No. 11, pp. 47-54.
2. Kwon, J. W. and Hong, H. K., 2012, Enhancement of stratification for solar water storage tank with spiral jacket and coil (Part 1 : Verification experiment), Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 336-342.
3. Nam, J. H., Kim, M. C., Kim, C. J., and Hong, H.

- K., 2008, CFD analysis for spiral-jacketed thermal storage tank in solar heating systems, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 20, No. 10, pp. 645-653.
4. Chung, J. D., Park, J. H., and Cho, S. H., 2004, Effect of design factors on the performance of stratified thermal storage tank, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 1077-1084.
5. Dincer, I. and Rosen, M. A., 2002, *Thermal Energy Storage*, John Wiley & Sons, New York, pp. 95-122.
6. Musser, A. and Bahnfleth, W. P., 1998, Evolution of temperature distributions in a full scale stratified chilled-water storage tank with radial diffusers, *ASHRAE Transactions*, Vol. 104, pp. 55-67.
7. Zurigat, Y. H., Liche, P. R., and Ghajar, A. J., 1991, Influence of inlet geometry on mixing in thermocline thermal energy storage, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, No. 1, pp. 115-125.
8. Brown, N. M. and Lai, F. C., 2011, Enhanced thermal stratification in a liquid storage tank with a porous manifold, *Solar Energy*, Vol. 85, No. 7, pp. 1409-1417.
9. Hong, H. K. and Kim, H. K., 1986, A study on thermally stratified hot water storage tank in a solar heating system, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 87-96.
10. Andersen, E., Furbo, S., and Fan, J., 2007, Multilayer fabric stratification pipes for solar tanks, *Solar Energy*, Vol. 81, No. 10, pp. 1219-1226.
11. Yee, C. K. and Lai, F. C., 2001, Effects of a porous manifold on thermal stratification in a liquid storage tank, *Journal of Solar Energy*, Vol. 71, No. 4, pp. 241-254.
12. Loehrke, R. I., Holzer, J. C., Gari, H. N., and Sharp, M. K., 1979, Stratification enhancement in liquid thermal storage tanks, *Journal of Energy*, Vol. 3, No. 3, pp. 129-130.
13. Park, D. H., Ryu, D. W., Choi, B. H., Choon, S. W., and Han, K. C., 2013, Method to characterize the thermal stratification in thermal energy storages, *Korean Journal of Tunnelling and Underground Space*, Vol. 23, No. 1, pp. 78-85.