

단열층 사용을 통한 성층 축열조 성능개선 §

임세화* · 이태규* · 신승원*†

* 홍익대학교 기계공학과

Performance Improvement of Stratified Thermal Storage Tank Using Heat Insulator

Se Hwa Lim*, Tae Gyu Lee* and Seungwon Shin*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hongik Univ.,

(Received March 19, 2014 ; Revised March 29, 2014 ; Accepted March 29, 2014)

Key Words: Stratified Thermal Storage(성층축열조), Heat Insulator (단열층), Thermal Boundary Layer(온도경계층),

초록: 본 연구에서는 지역난방 공사에서 사용하고 있는 성층 축열조의 불가용 에너지를 줄이기 위해 단열층을 설계하였다. 단열층은 추가적인 장치 없이 고온수와 저온수의 밀도차이로 생기는 부력으로 운용된다. 축열조의 내부 온도분포를 모사할 수 있는 해석모델을 Matlab Simulink 를 이용하여 제작하고 해석 결과를 이용하여 단열층의 소재와 두께를 결정하였다. 또한 축열조의 축소실험을 통하여 단열층의 운용 가능성을 확인하였다. 실험 결과, 단열층이 축열·방열과정에서 고온수와 저온수의 혼합과 열전도로 인한 온도 경계층형성을 효과적으로 억제할 수 있다는 것을 확인하였다. 단열층을 설치한 축소실험에서는 단열층이 없는 축열조보다 약 1540 J의 추가 가용에너지가 보존되었고 이를 실제 축열조에 적용할 경우 약 6%의 축열효율이 증가될 것으로 예상된다.

Abstract: The purpose of this study is to design a heat insulator for reducing available energy loss in stratified thermal storage tank. Heat insulator is operated by buoyancy effect from density difference between hot and cold water without extra equipment. Analysis model using the Matlab Simulink was developed to estimate the internal temperature distribution in thermal storage tank and also used to select proper material and thickness of the heat insulator. Operational feasibility was confirmed through reduced scale experiment. As a result, heat insulator can effectively delay the formation of thermal boundary layer between hot and cold water. In reduced scale experiment, heat insulator can preserve additional 1540J of available energy. When applied to the real thermal storage tank, increase of 6% thermal storage efficiency can be expected.

1. 서론

화석연료 고갈과 환경 문제에 대한 대응으로 풍력, 지력, 태양열과 같은 청정에너지에 대한 관심이 급증하고 있다. 그러나 청정에너지는 시간에 따른 수요와 공급이 일치하지 않기 때문에 에너지를 저장해 두기 위한 저장매체가 필요하다. 다양한 에너지 저장 매체 중에서 성층 축열조는 낮은 초기 설치비와 유지비에 비해 높은 효율을 갖기 때문에 지역난방이나 대규모 열에너지를 저장하기 위한 장치로 많이 사용되고 있다. 성층 축열조는 온도에 따른 물의 밀도차이를 이용하여 고온수와 저온수를 함께 보관하는 장치로 축열조의 부피를 줄일 수 있는 장점이 있다. 하지만 성층 축열조는 고온수와 저온수를 함께 보관하기 때문에 고온수와 저온수 사이에 열 확산이 일어나 온도가 섞이게 되며 이렇게 온도가 섞여있는 층을 온도 경계층이라고 부른다. 온도 경계층은 시간이 지날수록 확산되며 가용 열에너지 손실이 발

§ 이 논문은 제3회 전국 학생 설계 경진대회(2013. 11. 9., 서울대) 수상 내용을 토대로 한 논문임

† Corresponding Author, sshin@hongik.ac.kr

© 2014 Dept. of Mechanical Engineering, Hongik Univ

생한다. 현재 한국지역난방공사에서 사용하고 있는 대부분의 성층 축열조는 가용용량이 약 2763 GJ 이며 전국에 25 기를 운용 중이다. 당인리 지역난방공사에서 사용되는 성층 축열조의 경우 한 기에서 온도 경계층으로 인한 불가용 열에너지량은 약 233 GJ 로 전체 에너지의 8.34 %를 차지하고 있으며 신재생 에너지의 사용이 증가함으로 이와 같은 대규모 축열조의 사용이 증가될 것으로 예상된다. 따라서 성층 축열조의 성능을 높이기 위해서 온도 경계층 형성을 최소화 하는 것이 관건이다.

이에 온도 경계층을 억제하기 위해 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 이동연⁽¹⁾은 CFD 를 이용해서 고온수와 저온수가 유입되는 디퓨저의 각도와 형상을 조절하여 수조 내부의 와류를 억제함으로써 온도 경계층의 확산을 감소시켰다. 이영수와 이상남은⁽²⁾ 디퓨저의 형상과 분사속도를 조절하는 실험을 통하여 적합한 디퓨저의 형상과 분사속도를 결정하였다. 신미수 등⁽³⁾은 또한 CFD 를 이용하여 디퓨저의 형상이 성층 축열조의 온도 경계층에 미치는 영향을 조사하고 디퓨저의 형상은 평면형보다 곡면형이 온도 경계층을 유지하는데 유리하게 작용한다고 파악하였다. 그 밖에 성층 축열조의 디퓨저의 위치, 유량, 온도차이 등에 대한 연구들이 진행되었고, 대부분의 현재 연구들은 열 저장효율 향상 및 와류를 억제하는 유동에 의해 고온수와 저온수의 혼합을 최소화하는데 목적을 두고 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 고온수와 저온수를 같은 수조에 보관하기 때문에 발생하는 온도 경계층의 근본적인 억제 방안으로 고온수와 저온수 사이에 단열층을 삽입하는 방식을 제안하고자 한다. 이 단열층은 고온수와 저온수 사이의 밀도차이를 이용하여 추가적인 장치가 없어도 고온수와 저온수 사이에 위치할 수 있도록 적절한 밀도를 갖도록 설계되었다. 이를 이용하여 와류에 의한 온도 경계층 형성 및 열확산을 억제하고 성층 축열조의 열저장효율을 개선하고자 한다.

2. 단열층 설계

2.1 축열조의 축열과 방열 패턴

축열과정은 하부 디퓨저에서 빠져나온 저온수가 발전소의 응축기에서 발생하는 폐열과 같은 열원의 열에너지를 공급받아 축열조 상부 디퓨저로 유입되는 과정으로 축열조에 열에너지가 저장되는 과정이다. 방열과정은 반대로 고온수가 상부 디퓨저를 통해 수요처에 열에너지를 전달하고 저온수가 되어 하부 디퓨저로 유입되는 과정이다. 당인리 지역난방공사의 경우 당인리 발전소의 폐열을 이용하여 서울특별시의 목동 아파트단지의 지역난방을 공급을 한다. 낮에는 전기에너지의 수요가 많고 열에너지의 수요가 적으며, 밤에는 전기에너지의 수요가 적고 열에너지의 수요가 많다. 이러한 열에너지의 공급과 수요를

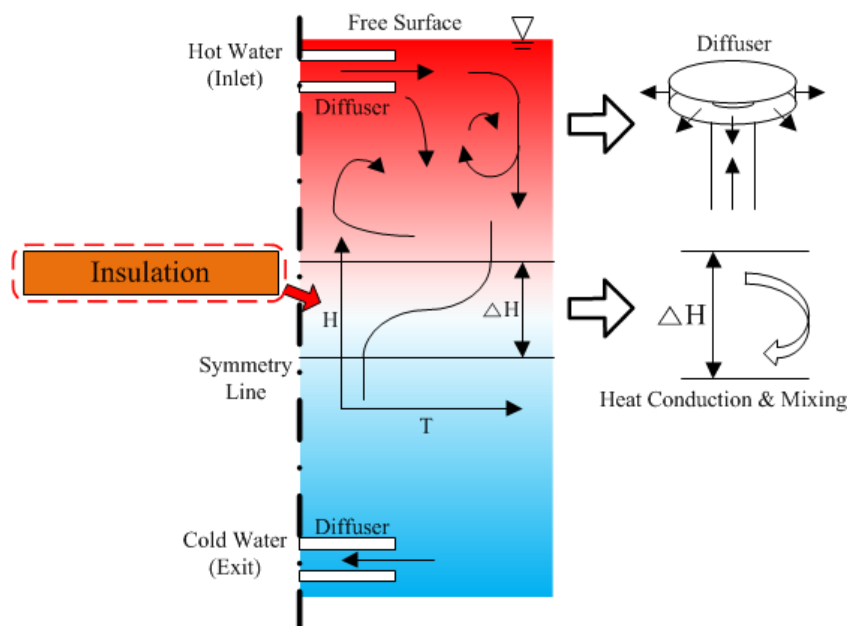


Fig. 1 Conceptual description of stratified thermal storage

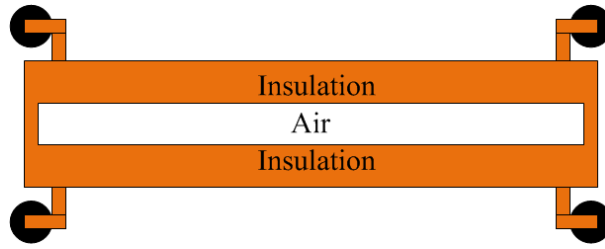


Fig. 2 Schematic diagram of proposing heat insulator

맞추기 위하여 당인리 지역난방공사에서는 축열 1 기를 운용 중이다. 따라서 본 연구에서는 성층축열조의 패턴을 축열과정이 11 시간동안 운용되고 방열과정이 13 시간동안 운용된다고 가정을 하여 단열층을 설계하였다. 즉, 단열층은 최소 11 시간동안 열확산을 지연시킬 수 있어야 한다.

2.2 물의 밀도차이를 이용한 단열층 설계

성층 축열조에 기계적 장치를 이용하여 단열층을 운용하면 설치비와 단열층의 운용비용이 증가된다. 따라서 추가적인 장치 없이 단열층을 운용할 수 있어야 한다. 이에 본 연구에서는 온도에 따른 물의 밀도차이를 이용하여 단열층을 운용할 수 있도록 설계하였다. 성층 축열조에는 98 °C의 고온수와 40 °C의 저온수가 저장된다. 고온수의 밀도는 959.78 kg/m³이고 저온수의 밀도는 988.93 kg/m³으로 단열층의 밀도를 중간 밀도를 갖도록 설계하였다. 따라서 고온수의 양과 저온수의 양이 주기적으로 변하는 성층 축열조 내부에서 단열층은 항상 고온수와 저온수의 사이에 위치할 수 있게 된다. 따라서 추가적인 동력 없이 운용이 가능하다.

Fig. 1 은 성층 축열조의 개념도이며 축열과정을 나타낸 것이다. 고온수가 유입되면서 발생한 와류로 고온수와 저온수가 혼합된다. 이 과정에서 고온수와 저온수 사이에서 열전달로 인해 발생하는 온도 경계층의 생성 위치를 보였다. 본 연구의 단열층은 고온수와 저온수의 중간 밀도가 되도록 설계되었으며 이로 인해 단열층은 항상 온도 경계층의 중간에 위치하게 된다. 이를 통해 와류에 의한 고온수와 저온수의 혼합을 방지할 수 있다. 또한 단열층을 물보다 열확산계수가 작은 물질을 이용하여 제작할 경우 열확산에 의한 온도 경계층의 생성 속도를 더욱 감소시킬 수 있다. 따라서 단열층의 사용을 통해 성층 축열조에서 가용에너지의 양을 증가시킬 수 있으며 기존의 유입수의 속도를 증가시켜 능동적으로 운용할 수 있게 된다.

2.3 성층축열조의 효율 정의

단열층을 삽입하여 성층 축열조의 성능 증가를 비교하기 위하여 축열조에서 고온수와 저온수의 양이 같고 물의 양이 변하지 않을 때 축열조의 효율을 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\eta = \frac{E_{\text{target time}}}{E_{\text{max}}} = \frac{(H-t)(T_{\text{avg}} - T_m)}{H(T_H - T_m)} \quad (1)$$

식 (1)에서 $E_{\text{target time}}$ 은 시간이 흐른 후의 축열조의 상부에너지를 나타내며, E_{max} 는 초기 축열조 상부의 에너지이다. H 는 축열조의 높이의 절반, t 는 단열층의 두께의 절반, T_{avg} 는 시간이 흐른 후의 축열조 상부의 평균온도, T_m 는 고온수와 저온수의 평균온도, T_H 는 고온수의 온도를 나타낸다. 앞서 단열층이 열확산을 지연해야 할 시간을 고려하여 목표 시간은 11 시간으로 설정하였다. 따라서 $E_{\text{target time}}$ 는 단열층이 설치된 축열조에서 11 시간이 지난 후의 축열조의 상부에너지이며, E_{max} 는 단열층이 없는 축열조에서 초기 상부에너지이다.

2.3 단열층의 형상 및 해석모델 구성

고온수와 저온수의 사이 밀도를 갖는 단열층의 작동원리는 고온수와 저온수의 밀도차이로 발생하는 부력으로 축열조 내부에서 위, 아래로 움직일 수 있다. 이 때 자중과 부력이 같아지게 된다. 축열조 내 부

에 고온수나 저온수가 유입될 때 유동은 있지만 단열층에 대한 물의 상대속도는 0 m/s 가 된다. 따라서 단열층은 고온수와 저온수가 만나는 지점에 항상 떠 있을 수 있다. 또한 단열층의 소재는 물보다 열확산계수가 작은 물질을 이용해야 한다. 하지만 물보다 열확산계수가 작은 물질들은 물보다 밀도가 크기 때문에 단열층의 부력을 증가시키기 위해서 본 연구에서는 단열층 중간에 공기층을 삽입하여 단열층 전체의 밀도를 조절하였다. 공기층의 두께는 단열층의 두께와 소재에 비례하여 증가한다. 또한 단열층의 무게중심이 단열층 중심에 있기 때문에 쉽게 기울어질 수 있다. 따라서 단열층의 안전성을 증가하기 위하여 Fig. 2 와 같이 상하에 롤러 6 개를 부착하여 모멘트를 견딜 수 있도록 설계하였다. 6 개의 롤러는 상하에 3 개씩 120 도의 각도로 부착하였다.

수치해석을 통하여 단열층의 소재를 선정하였다. 축열조 내부는 유동이 거의 없기 때문에 대부분의 열전달이 전도로 일어난다고 가정할 수 있다. 따라서 식 (2)의 원통좌표계의 푸리에 열전도 방정식을 이용하여 해석을 진행하였다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[kr \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

성층 축열조에서 열전달은 고온수와 저온수 사이의 열전달과 외벽과 내부 물의 열전달이 있다. 이 중 고온수와 저온수 사이의 열전달이 지배적이므로 식 (2)를 1 차원으로 해석을 해도 무방하며 내부 발열이 없기 때문에 식 (3)과 같이 단순하게 나타낼 수 있다. 식 (3)을 중앙차분하여 수치해석 관계식 (4)를 얻었다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

$$\left[\frac{k}{\rho C_p L^2} + C_{\text{diffusion}} \right] [T_{n+1} - 2T_n + T_{n-1}] = \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} \quad (4)$$

식 (4)에서 $C_{\text{diffusion}}$ 은 자연대류에 따른 물질확산을 고려하기 위한 상수이다. Matlab Simulink 를 이용하여 식 (4)에 대한 해석모델을 구성하였다. 높이 30 m, 지름 24 m 의 성층 축열조의 절반을 1 차원으로 해석하였다. 격자의 수는 150 개이며 Δt 는 1 초로 설정하였다. 해석모델을 이용하여 단열층의 소재와 두께를 변화시켜가며 목표 시간 동안 해석을 진행하였다. 해석모델을 검증하기 위하여 Fig. 3 과 같은 축소 실험을 수행하였고, 단열막이 없는 경우 온도경계층에서의 온도분포 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 해석모델을 통해 구해진 온도분포가 실험결과와 매우 유사함을 확인할 수 있다.

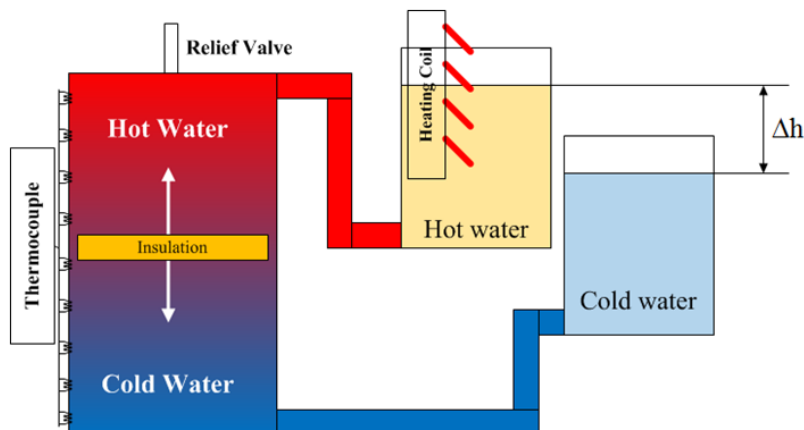


Fig. 3 Schematic diagram of reduced scale experiment

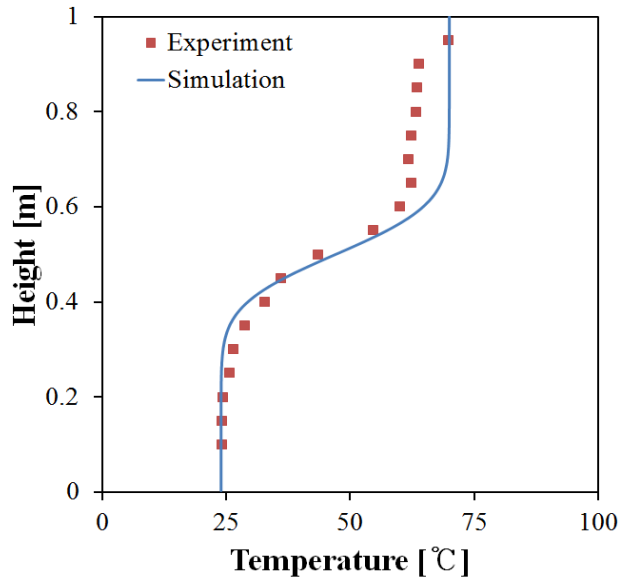


Fig. 4 Comparison of internal temperature distribution between analysis model and reduced scale experiment

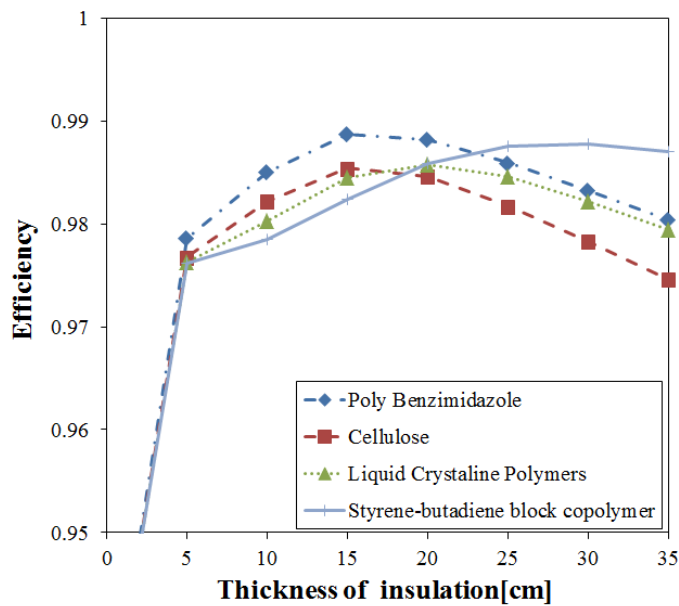


Fig. 5 Efficiency vs. the thickness for the various insulating materials

실험결과를 통해 해석모델의 정확성이 검증되었고 다양한 물질의 단열층 적용가능성을 해석적으로 분석하였다. 해석에 사용된 소재는 열확산계수가 물보다 작은 Poly Benzimidazole, Cellulose, Liquid Crystalline Polymer, Strene-butadiene block copolymer 을 이용하여 진행하였다. 그 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 앞서 식 (1)에서 정의한 효율에서 단열층이 삽입되므로 축열물질인 물의 양이 줄어드는 것이 포함되게 된다. 따라서 각 소재의 밀도에 따라 공기층의 두께가 달라지고 축열조의 효율에도 영향을 미친다. 결국 각 물질마다 목표 시간 동안 최고 효율을 갖는 단열층의 두께는 서로 다르게 된다. 해석 결과 Poly Benzimidazole 은 단열층의 두께가 15 cm 일 때 최대 효율을 낼 수 있으며, Strene-butadiene block copolymer 는 단열층의 두께가 30 cm 일 때 최대 효율을 낼 수 있다. 본 연구에서는 효율이 가장 높고 내열성과 기계적 강도가 우수한 Poly Benzimidazole 를 단열층의 소재로 선정하였다.

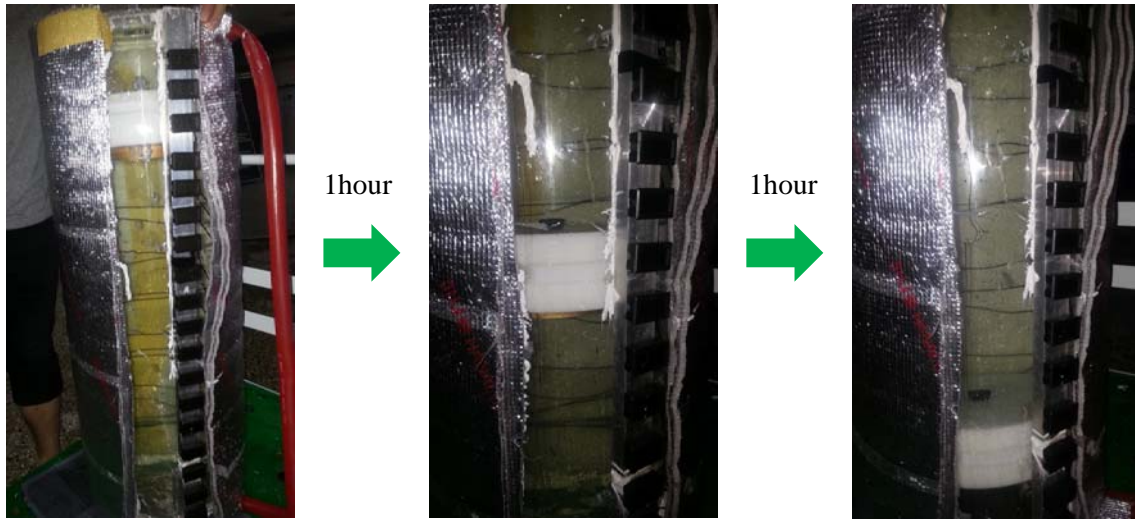


Fig. 6 Location of heat insulator during heat charging experiment

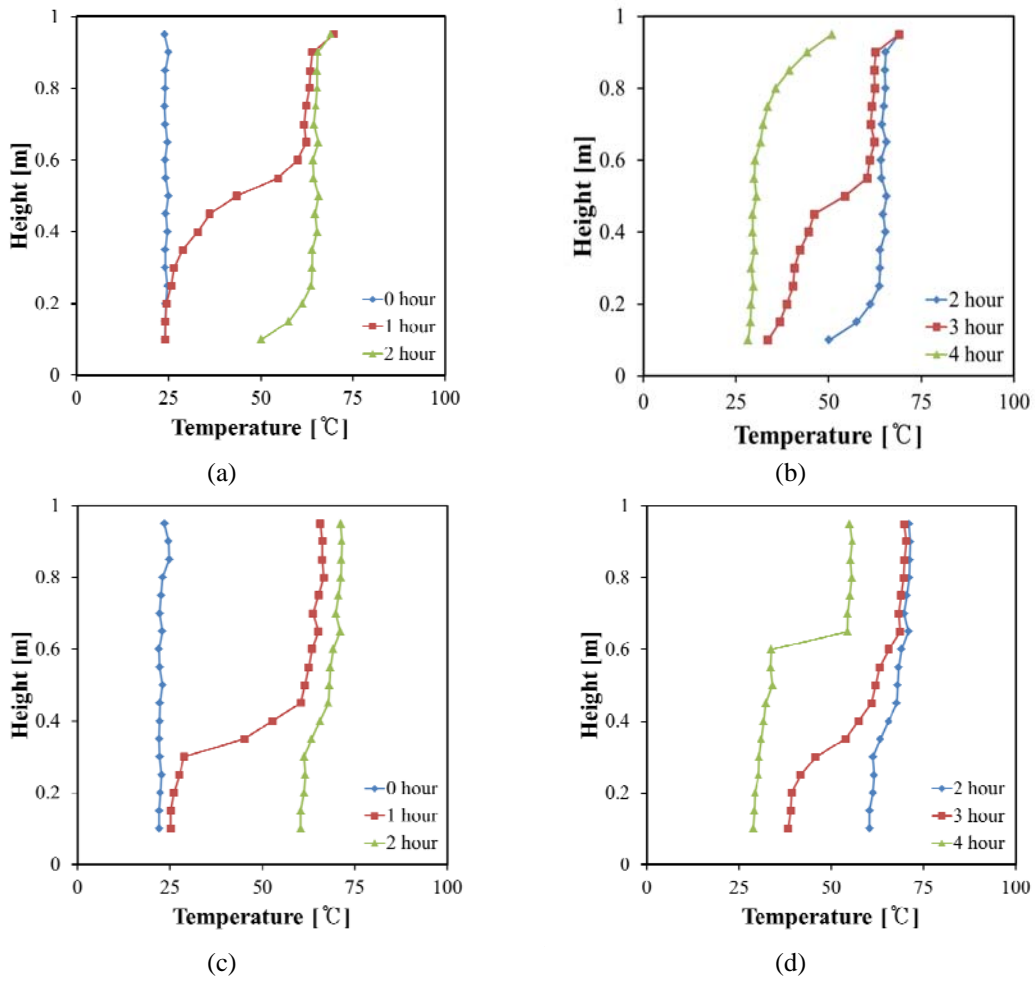


Fig. 7 Temperature distribution of experiment (a) heat-charging process without heat insulator, (b) heat-discharging process without heat insulator, (c) heat-discharging process with heat insulator, (d) heat-charging process with heat insulator

2.4 축소실험 구성

단열층 운용 가능성을 확인하기 위하여 단열층이 없는 경우와 동일한 축소실험을 수행하였다(Fig. 4 참조). 고온수와 저온수의 공급 및 회수는 고온수의 수면과 저온수의 수면 사이 높이 차이를 만들어 유량을 조절하였다. 따라서 고온수와 저온수를 보관하는 수조를 제외하고 모두 밀폐시스템이다. 축열조는 직경 0.3 cm, 높이 1 m로 제작을 하였으며 일정 간격으로 온도계를 설치하였으며 축열조의 상부에 내부의 고압으로 인한 축열조의 파손을 방지하기 위하여 Relief Valve 를 설치하였다. 고온수는 1.5 kW 급탕기에 해당하는 설정온도를 유지하도록 하였으며 저온수는 상온을 유지할 수 있도록 하였다. 축소실험에 사용된 단열층은 제작이 용이한 아크릴을 이용하였으며 밀도는 1200 kg/m^3 이고 비열은 1500 J/kg-K , 열전도도는 0.19 W/m-K 으로 물보다 열확산계수가 작다.

고온수와 저온수의 공급은 1 시간 동안에 수면의 높이차이가 30 cm 가 되도록 설정하였다. 이 때 수면이 높은 수조에서 물이 빠지면서 수면이 낮은 위치의 수조로 유입되어 낮은 위치의 수조는 수위가 높아지게 된다. 따라서 실질적인 높이차이는 15 cm 이며 수조의 지름이 약 50 cm 이므로 저장용기에서 1 시간 동안 유입된 물의 양은 약 29.4 L 이고 이 때 평균 유량은 0.0082 L/s 이다. 온도 측정은 1 시간 간격으로 측정을 하였으며 축열 2 시간, 방열 2 시간으로 총 4 시간의 실험을 진행하였다.

2.5 축소실험 결과

축소 실험은 고온수의 온도를 $70 \text{ }^\circ\text{C}$, 저온수의 온도를 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 유지하며 진행하였다. 단열층이 삽입된 축열조의 축소실험과정을 Fig. 6 에 나타내었으며 고온수나 저온수의 양에 따라 위치가 변하는 것을 확인하였다. Fig. 6 은 축열과정 중 시간에 따른 단열층의 위치를 나타낸 그림으로 6 개의 롤러를 부착한 단열층이 기울어지지 않고 운용이 되는 것을 확인하였다. 축소실험 결과 온도분포가 Fig. 7 과 같이 나타났으며 4 시간이 지난 후 단열층으로 인해 온도 온도구배가 더 많이 생기는 것을 확인할 수 있다. 실험 결과를 이용하여 기존 축열조와 단열층이 포함된 축열조 효율을 비교한 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 단열층의 효과는 축열, 방열과정에서 뚜렷하게 확인할 수 있다. 축열과정에서 고온수가 유입되면서 와류가 형성되어 고온수와 저온수가 혼합되는 것을 단열층이 차단해주고 온도를 보존할 수 있기 때문에 효율이 증가하였다. Fig. 8 의 초기에 단열층이 포함된 축열조의 효율이 낮은 이유는 단열층의 두께만큼 저장할 수 있는 총 에너지가 줄어들기 때문이다. 1 시간이 지난 후에 단열층이 고온수와 저온수의 혼합을 차단하기 때문에 효율이 기존의 축열조보다 높게 나타나며 2 시간 뒤 효율은 축열조의 대부분이 고온수로 저장되어 효율의 차이가 거의 없다. 방열과정 중에는 효율이 기존 축열조보다 크고, 시간이 지날수록 그 차이가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

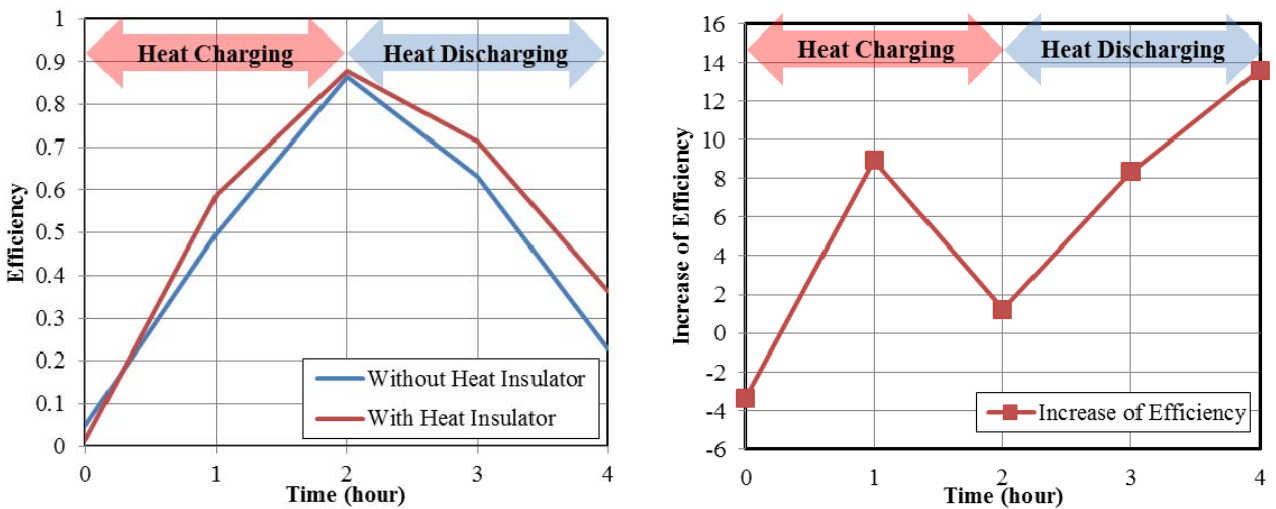


Fig. 8 Efficiency comparison between original and improved thermal storage tank with heat insulator

3. 결 론

본 연구에서는 성층 축열조 내부에 단열층을 삽입하여 축열효율을 증가시켰다. 이론해석을 통해 적절한 단열층의 두께를 선정하였으며 실험을 통해 해석결과를 검증하였다. 실험에서 높이 1 m, 지름 0.3 m 인 축열조를 이용해 축열과정에서 879.7 J 의 가용에너지를 보존할 수 있었으며 방열과정 중 794.2 J 의 가용에너지를 보존하였다. 실험에서 가정한 축열조 패턴인 4 시간이 지난 후에는 1542 J 의 가용에너지를 보존하여 고온수와 저온수의 혼합과 열전달로 인한 열확산을 지연시킬 수 있었다. 또한 열확산은 높이 방향으로 열전달이 지배적이므로 축열조 운용에 있어 고온수와 저온수의 온도와 최대 운용시간이 결정 되면 단열층의 두께도 정해지게 된다. 현재 당인리 지역난방공사의 운용조건은 최대 11 시간 동안 운용이 되고 고온수의 온도는 98 °C, 저온수의 온도는 68 °C로 15 cm 정도 두께의 단열층 삽입 시 약 6 %의 축열효율이 증가될 것으로 예상된다. 또한 더 많은 양의 고온수와 저온수가 들어와도 서로 혼합되는 것을 단열층이 방지하기 때문에 유연한 운용이 가능하다. 현재 당인리 지역난방공사에서 사용되는 성층 축열조의 가용용량은 약 2796 GJ 이고 경계층에서 손실되는 가용에너지량은 233 GJ 로 전체 에너지의 8.4 %를 차지한다. 지역난방공사에 운용중인 성층 축열조가 25 기 이므로 단열층을 삽입함으로써 성층 축열조 약 2 기 분량의 가용에너지 확보가 가능하게 된다.

후 기

본 논문은 제 3 회 학생설계경진대회 입상한 논문임.

참고문헌 (References)

- (1) 이동연, 2008, “발전플랜트용 축열조 온수공급관 디퓨저의 성능해석”, 한양대학교 대학원.
- (2) 이영수, 이상남, 2005, “온도 성층축열조 설계, 제작 및 실증분석에 관한 고찰”, 대한설비공학회 2005 년 국제할술강연회 및 신기술발표회, pp. 426~444
- (3) 신미수, 김혜숙, 송혜영, 장동순, 이영수, 이상남, 2002, “성층축열조 최적설계를 위한 연구”, 한국전산 유체공학회 2002 년 추계학술대회 논문집, pp. 127~132.
- (4) 임종성, 1993, “공조용 축열 시스템”, 대한기계학회지, Vol. 33, No. 2, pp. 183~190.
- (5) 이동혁, 장종훈, 2002, “축열 시스템의 열적 성층화 효과에 관한 해석적 연구”, 대한기계학회 2002 년 도 춘계학술대회 논문집, pp. 2131~2136.
- (6) 이진태, 2001, “지역난방용 축열조의 소개”, 대한설비공학회 설비저널, Vol. 30, No. 12, pp. 35~37.
- (7) F. J. Opperl, A. J. Ghajar and P. M. Moretti, 1986, “Computer simulation of stratified heat storage”, Applied Energy, Vol 23, No. 3, pp. 205~224.
- (8) Ghanim Kadhém Abdulsada and Mohammed Hamed Mahmoud, 2008, “Enhancing Thermal Stratification in Liquid Storage Tanks During Relaxation Periods”, Journal of Engineering and Development, Vol. 12, No. 1, pp. 161~175
- (9) J. Van Berkel, 1996, “Mixing in Thermally Stratified Energy Stores”, Solar Energy, Vol. 58, No. 4, pp. 203~211.