

## 성층축열조 최적설계를 위한 연구

A Study for optimum design of Thermal Storage tank

\*신미수\*<sup>1)</sup>, 김혜숙<sup>1)</sup>, 송혜영<sup>1)</sup>, 장동순<sup>1)</sup>, 이영수<sup>2)</sup>, 이상남<sup>2)</sup>

Dong-Soon Jang, Mi-Soo Shin, Hey-Suk Kim, Hye-Young Song,  
Young-Soo Lee, Sang-Nam Lee

### Abstract

Numerical and experimental works have been made in order to figure out the physical mechanism of thermal storage system for the determination of optimal design and to enhance the thermal efficiency of the system. To this end a computer program is developed and evaluated successfully against experimental data measured with a bench scale facility. Considering the thermal efficiency of storage is critically impaired by the mixing effect, the minimum flow mixing situation is calculated by the assumption of uniform plug-type flow as a reference condition. Further a parametric systematic calculations have been made for a hypothetical full-scale storage system with Fr, storage dimension, diffuser type and loading hour, etc.

### 1. 서론

축열조는 고온의 유입수와 저온의 저장수의 혼합효과를 열적 부력을 이용하여 적절히 감소시켜 온도의 성층화를 유지하는 열저장 장치이다. 이것은 전력에 의한 에너지 발생과 소비자의 수요사이에 존재하는 시간에 따른 에너지 수급의 불균형을 성층형성에 의해 가용 저장 에너지 능력을 극대화함으로써 극복하고자 하는 시스템이다.

국내의 일산, 인천, 분당과 같은 신도시의 대단위 아파트 단지에서는 지역난방을 선택하고 있는데 이와 같은 지역난방은 대규모 열원시설(열병합 발전소, 열전용 보일러, 쓰레기 소각로 등)에서 경제적으로 생산된 열을 이용하여 발전된 에너지는 축열조와 열교환기, 열수송관 등을 통해 공급된다.

축열조 내 성층은 밀도차이로 주어지는 부력효과와 유입유량, 축열조의 크기와 형상에 가장 큰 영향을 받으며 유·출입구의 위치 및 크기와 diffuser의 형상에 의한 유입패턴 등에도 실질적인 영향을 받는다. 현장 엔지니어는 보통 이를 경험적인 무차

원 변수인 Re(관성/저항력) 수와 Fr(관성/부력) 수 등으로 나타내어 현상학적인 간단한 분석의 변수로서 사용하기도 한다.<sup>2),3)</sup> 그러나 이러한 현상학적인 분석외에 고효율 축열조의 물리적인 기전 이해에 따른 설계와 운전조건을 개선을 위하여서는 수치해석적인 방법이 신뢰성 있는 실험과 병행되어야 한다.

본 연구의 목적은 주어진 조건에서 저온수 탱크에 고온수를 주어진 유량으로 충전하는 과정에서 고온수와 저온수간의 열전달을 최소화하여 성층도를 높여 에너지 효율을 극대화하고자 하는 것이다. 이를 위하여서는 충전 초기에 가능하면 고온수 유입구 근처에서 재순환 유동에 의한 고온수와 저온수간의 혼합을 최소화하여야 하며, 비록 혼합이 이루어지지 않는 상황이라고 하여도 충전 시간의 불필요한 지체로 인한 고온수와 저온수간에 성층을 통한 열전달 시간을 최소화하여하는 점도 동시에 고려되어야 한다.

### 2. 이론적 고찰

성층 형성의 이해를 위하여 고려하여야

1) 충남대학교 환경공학과 (305-764, 대전 유성구 궁동 220, Tel. 042-821-6677)

2) 한국에너지기술연구원 미활용에너지연구팀 (305-343, 대전 유성구 장동 71-2, Tel. 042-860-3161)

주요 기전은 아래의 네 가지로 요약된다.

- ① 관성력과 점성력 (Re수)
- ② 관성력과 부력 (Fr수)
- ③ 유동 패턴
- ④ 충전시간에 따른 열전달 시간

위에서 언급한 성층형성에 영향을 주는 인자를 보다 자세히 고려하면 국부혼합에 의한 열전달, 재순환에 의한 유동패턴, 축열조 벽면을 통한 열전달 등 성층구배를 완만하게 하는 인자라 할 수 있다. 국부혼합이나 유동패턴에 의한 열전달은 보통 Re수와 Fr 수에 의해 그 강도가 좌우되며 충전시간이 길어질수록 그 양이 증가한다

설계의 기본이 되는 무차원 변수는 Diffuser 입구에서의 Re수와 Fr수로 아래식 (1)과 (2)로 표현된다. 실험실 규모의 연구 결과에 의하면 최적의 온도 성층을 얻기 위한 Re의 값은 약 800 이며, Fr 수는 2 정도로 알려져 있다.<sup>4),5)</sup>

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{q}{\nu} \tag{1}$$

$$Fr = \frac{q}{[h_i^3 g \Delta \rho_i / \rho]^{1/2}} \tag{2}$$

- q = diffuser 단위 길이당 유량
- hi = diffuser의 slot 높이
- l = diffuser의 원주길이

식 (2)의 관성력과 부력의 비율인 Fr 수는 밀도차가 작을수록, 들어가는 유량이 클수록 Fr 수는 증가하며 이는 그 크기에 따라서 당연히 성층도에 긍정적으로 또는 부정적으로 영향을 주는 인자로 작용한다. 즉 Fr수에 따라서 최대 성층도를 나타내는 영역이 나타날 것으로 예상되는데 이는 유량의 강도가 커질수록 열전달에 의한 체류시간 감소와 관성력의 증가가 상반된 효과로 작용하기 때문이다.

축열조내 성층형성 과정을 도식도로 살펴

보면 Fig.1 과 같다.

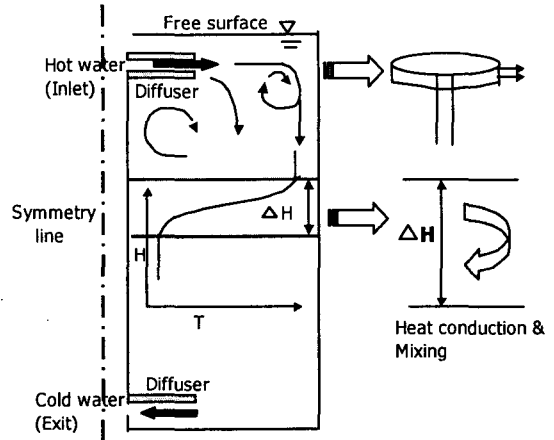
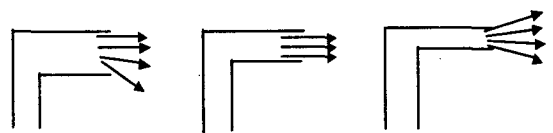


Fig. 1. 축열조 내의 성층형성

유량을 일정하게 유지할 경우 슬롯 높이 변화에 따른 diffuser의 분사속도는 유입되는 유동의 형태에 크게 영향을 주며 이는 결국 축열조의 성층도에 영향을 준다. Fig. 3은 동일한 유량에서 유입속도(v<sub>in</sub>)와 diffuser slot의 높이(h<sub>i</sub>)를 변화했을 경우 정상적인 유동형태를 보여준다.



- (i) 분사속도가 작을 경우
- (ii) 분사속도가 적당할 경우
- (iii) 분사속도가 클 경우

Fig.2. Diffuser의 분사속도에 따른 유동형태

Fig. 2의 (i)는 분사속도가 작은 경우 하류방향으로의 하향 모멘텀이 발생하게 되어 불필요한 재순환 유동을 일으킬 가능성이 있고 성층도를 감소시키는 인자로 작용할 것으로 판단된다. 그러나 위의 3가지 경우는 모두 일정한 유량을 가정한 것으로서 성층구간을 통한 전도에 의한 열전달 시간은 같을 것으로 판단된다. 분사 속도가 큰

Fig. 2 (iii)에서는 유입유동이 축열조 벽면에 부딪혀 상부에 재순환 영역을 형성하게 되며 이는 혼합효과를 극대화시켜 열전달을 증가시키게 된다. 결국 위의 두 경우 모두 혼합에 의한 열전달 증가로 인해 성층도는 낮게 측정된다. 이는 실험에 의해서도 부분적으로 확인한 결과이므로 성층도를 증가시키기 위해서는 최적의 diffuser slot의 높이와 분사속도가 바람직할 것으로 판단된다.

3. 수치해석적 방법

<일반 지배방정식>

본 연구에서 사용한 축대칭 원통좌표계의 각각의 종속변수에 대한 확산계수와 생성항을 table 1에 정리하였다.<sup>1)</sup>

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (3)$$

한편 유동혼합의 최소 상태로 판단되는

축방향으로 일정속도를 가진 'plug-type' 유동조건에 대해서는 온도장에 대해 아래와 같은 지배방정식의 해를 얻었다.

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \frac{k}{c_p} \nabla T \right) - u_{constant} \frac{\partial(\rho T)}{\partial x} \quad (4)$$

중·소형 축열조는 층류를 가정하였으며, 대형 축열조는 난류를 가정하여  $k-\epsilon$  난류 모델을 적용하였다.

온도장 해석시 중요한 것은 부력항을 나타내는  $-\rho g$  항에 대한 계산이다. 특히 압력을 'hydrostatic pressure'를 뺀 변형압력을 사용할 경우 부력항은  $-(\rho - \rho_{ref})g$ 로 표시된다. 이 경우 밀도  $\rho$ 는 온도에 따른 밀도값을 테이블화하여 선형으로 보정한 값을 취하였다. 그리고 기준이 되는 'reference' 밀도는 더운물을 충전하는 경우에는 저장수에 해당하는 찬물의 온도에 해당하는 밀도로 계산하였다.

Table 1.  $\Gamma_\phi$  and  $S_\phi$  expressions of 2-D cylindrical coordinate

	$\phi$	$\Gamma_\phi$	생성항( $S_\phi$ )
Axial Momentum	$u$	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial b}{\partial x}$
Radial Momentum	$v$	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_{eff} r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2 \mu_{eff} \frac{v}{r^2} + \frac{\rho w^2}{r} - \frac{\partial b}{\partial r} - \rho g$
Tangential Momentum	$w$	$\mu_{eff}$	$-\left( \frac{\mu_{eff}}{r^2} + \frac{\rho v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mu_{eff}}{\partial r} \right) w$
Kinetic Energy	$k$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_{k1} - \rho \epsilon$
Kinetic Energy Dissipation Rate	$\epsilon$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_{k1} - C_2 \rho \epsilon)$
Temperature	$T$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_T}$	—

$G_k = 2\mu_t \left[ \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\bar{v}}{r} \right)^2 \right] + \mu_t \left[ \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 + \left( r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\bar{w}}{r} \right) \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \right]$   
 $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 0.9, \sigma_\epsilon = 1.22$

성층도(degree of stratification)는 축열조의 열성층 정도를 판단하는 중요한 척도가 되며 이에 영향을 주는 인자로는 유입 유량의 변화율, 기준 온도차, 유입구의 기하학적 형상 등 여러 가지가 있다. 일반적으로 유입유량의 변화율이 적고 기준온도차가 클수록 천이온도 구배층인 thermocline 영역의 높이를 작게 유지하여 성층도를 증가시키고 성층효율이 좋아지는 것으로 알려져 있다.

Fig. 3에 수치해석에 사용한 기본 도식도와 경계조건을 나타냈다.

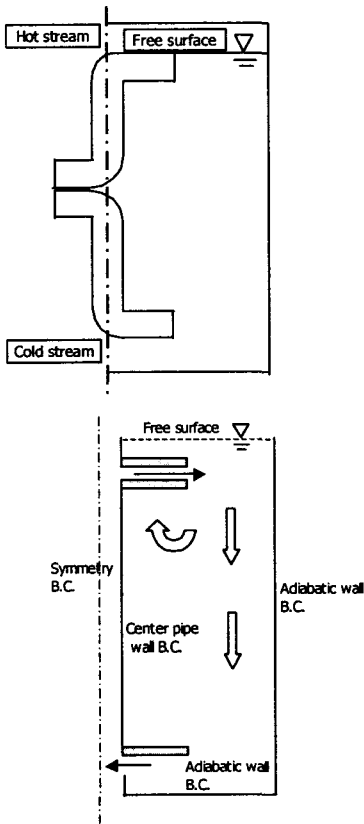


Fig. 3. 성층축열조의 도식도 및 경계조건

#### 4. 실험 및 계산결과

효율적인 축열조의 설계와 최적운전조건 설정을 위하여 1차년도 및 2차년도에 소형

및 중형 축열조 프로그램을 세부적으로 실험데이터와 검증하는 과정을 거쳐 주요 변수인 유량, 온도차이, 입구의 기하학적 형상, 분배판의 형상에 따른 영향 및 축열조 수인 유량, 온도차이, 입구의 기하학적 형상, 분배판의 형상에 따른 영향 및 축열조 내부에 성능향상을 위한 보조장치 설치 등에 따른 축열조 내부의 열유동과 성층화 기전을 파악하고자 여러 가지 수치모사를 실시하였다.

Fig. 4는 프로그램을 검증하기 위하여 소형 축열조에서 실험데이터와 계산결과를 비교하였는데 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 소형 및 중형 축열조에서 얻은 연구결과를 바탕으로 실제 scale-up한 대형 축열조에 대한 예비 수치모사를 실시하였다.

Fig.5는 대형 축열조에서 혼합효과가 최소한도로 유지되었다고 판단되는 일정속도의 plug-type 유동에 대한 온도분포와 난류유동의 온도분포를 보여준다. plug-type의 경우 성층도가 최대로 판단되며 다른 변수연구의 기준으로 삼았다. 난류유동의 경우보다 성층도도 높게 나타났고, 더운물의 진행속도도 다소 빠르게 나타났다.

Fig. 6은 대형 축열조에서 축열조 충전 시간에 따른 결과를 나타낸 것이다. 충전 시간이 증가할수록 성층도가 감소되는 것을 볼 수 있는데 이는 충전 시간 증가에 따른 열전달 효과의 증가에 따른 것으로 판단된다.

Fig. 7은 diffuser의 type을 달리 한 경우에 대한 온도분포 결과이다. 결과에 나타나 있듯이 평면형에 비하여 곡면형을 사용한 경우 더운물의 진행속도도 다소 빠르게 나타났고 성층도도 좋게 나타났다.

Fig. 8은 평면형 분배판 사용시 유량은 동일하게 유지하고 slit 간격과 유입속도를 변화시킨 결과이다. 성층도는 거의 동일하

게 나타났고 slit 간격이 좁고 유입 유속이 클 때 더운물의 진행속도가 다소 빠르게 나타났다. Fig. 9는 곡면형 분배판 사용시 위와 동일한 경우에 대한 결과이다. 곡면형 사용시 유입 유속이 클 때 성층도가 좋게 나타났다.

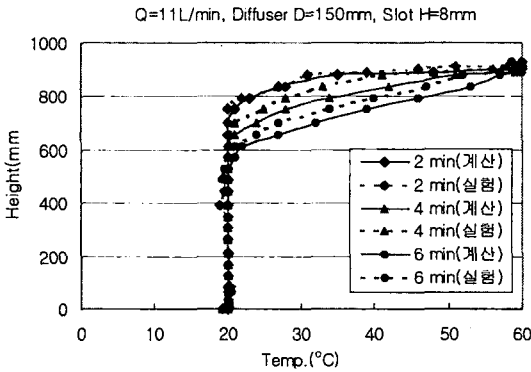
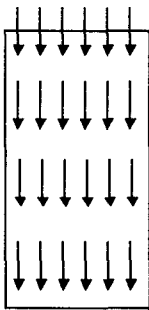


Fig. 4. 실험데이터와 계산결과의 비교



<축방향의 일정속도를 가진 plug-type 유입형태>

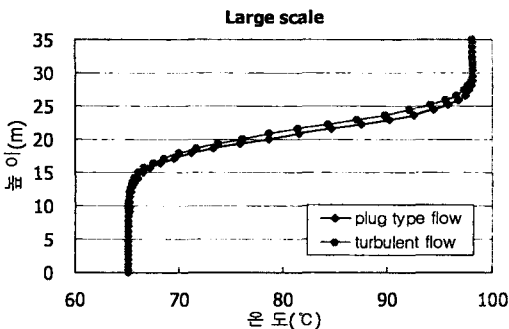


Fig.5. plug-type과 유동계산의 온도 비교

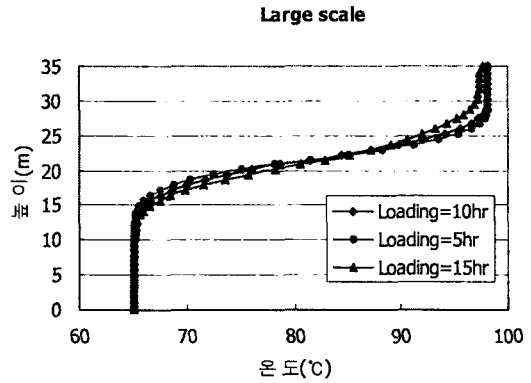


Fig. 6. 충전 시간에 따른 온도분포

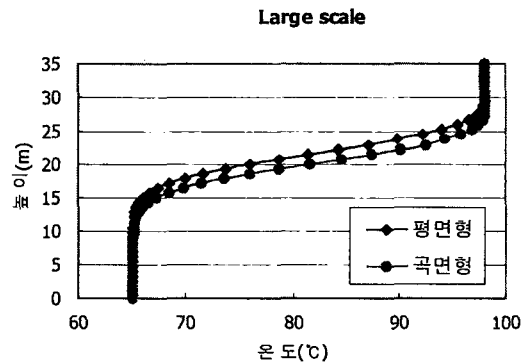


Fig. 7. 분배판 형상에 따른 온도분포

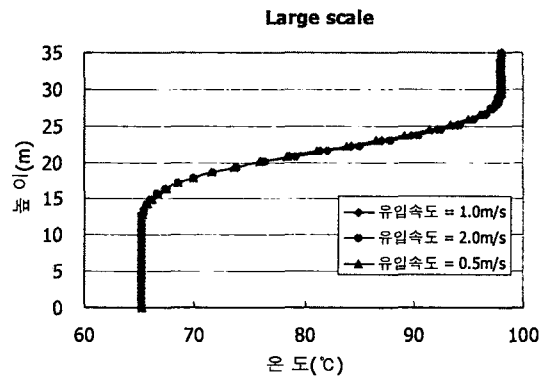


Fig. 8. 유입속도에 따른 온도분포 (분배판형상 : 평면형)

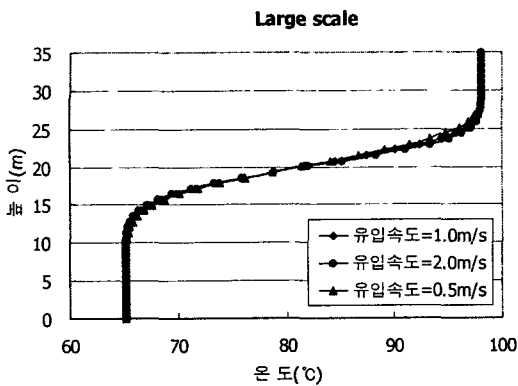


Fig. 9. 유입속도에 따른 온도분포  
(분배판형상 : 곡면형)

## 5. 결론

(1) 대형 축열조의 경우 난류유동을 가정하였고 소형이나 중형에 비하여 체적이 매우 증가해서 온도에 따른 유체의 물성 변화는 소형이나 중형에 비해서 적게 나타나는 양상을 보였다.

(2) 대형 축열조의 경우 성층도에 영향을 주는 여러 가지 인자 중 충전 시간에 가장 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났는데 실제의 경우 충전 시간은 임의로 정하는 것이 아니라 시간별 계절별 수요에 따라 적절하게 조정되어야 하는 것이므로 여건이 허락하는 범위내에서 충전시간은 되도록 길지 않게 하는 것이 성층도에 유리하게 작용할 것으로 사료된다.

(3) diffuser의 형태는 평면형 보다는 곡면형이 성층도에 유리하게 작용하는 것으로 나타났고, 평면형 분배판의 경우 유입속도가 다른 성층도의 변화가 거의 없었는데 곡면형 분배판의 경우 유입속도가 증가하여 Fr수가 증가할 때 성층도가 좋게 나타났다.

## 참고 문헌

[1] Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp.

Washington (1980).

[2] Wildin, M.W., Diffuser Design for Naturally Stratified Thermal Storage, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 14(2), 85-89 (1981).

[3] Baines, W. D., Martin, W. W. and Sinclair, L.A., On the Design of Stratified Thermal Storage Tanks, *International Journal Multiphase Flow*, 21, 141-193(1995).

[4] Kleninbach, E. M., Beckman, W. A. and Klein, S. A., Performance Study of One-Dimensional Models for Stratified Thermal Storage Tanks, *Solar Energy*, vol. 50, No. 2, pp155-166 (1993).

[5] Krane, R. J. and Krane, M. J. M., The Optimum Design of Stratified Thermal Energy StorageP Systems Part II : Completion of the Analytical Model, Presentation and Interpretation of the Results, *Journal of Energy Resources Technology*, vol.114/205, pp.204-208 (1992),

[6] Ghajar, A. J. and Zurigat, Y. H., Numerical Study of the Effect of Inlet Geometry on Stratification in Thermal Energy Storage, *Numerical Heat Transfer, part A*, vol.19, pp.65-83 (1991).

[7] Nakahara, N., Sagara, K. and Tsujimoto, M., Water Thermal Storage Tank : Part 2-Mixing Model and Storage Estimation for Temperature-Stratified Tanks, *ASHRAE Transactionm*, 94 (1988)