

수축열조의 온도 계층화에 대한 수치해석 및 실험적 연구

Numerical Analysis and Experiments for the Stratification of the Hot Water Storage

양 윤 섭* · 백 남 춘* · 김 흥 제* · 유 제 인** · 이 준 식***
Y. S. Yang, N. C. Baek, H. J. Kim, J. I. Yoo, J. S. Lee

Key words: Thermal Stratification(온도계층화), Thermal Storage(축열조), Off-Peak Electricity(심야전기), Flow Visualization(흐름가시화)

Abstract

In this study, the numerical analysis and experiments of the hot water storage using the thermal stratification techniques were carried out. The CPU time for a typical run of the the thermal stratification up to 900 seconds took one week for a 81×31 mesh size and 10 days for a 118×31 mesh size, respectively, for a cylindrical shape of the storage. In the initial stage, the numerical results were in favorable agreement with the experimental results, but it showed that the temperature gradients in the storage decreased gradually with time. It was also found that the increase of δt decreased the convergent speed due to the intensive fluctuation of the velocity field in every iteration. The increase of numbers of grids is projected to forecast a more accurate result, but it made the computing time longer and woul slow down convergence. At the experiments of the flow visualization, it was confirmed that the thermal stratification was apparently built up due to the installation of diffuser at the lower part of the storage. Thus, the thermal performance of the storage could be improved by installing the diffusers at the inlet and outlet.

기 호 설 명

a : 이산화방정식에 사용되는 계수
 g : 중력가속도 (m/sec^2)
 \sqrt{g} : Jacobian
 p : 압력 (kg/m^2)
 r : 반경방향 좌표 (m)
 t : 시간 (sec)
 S_ϕ : 생성항 (source term)
 T : 온도 ($^\circ C$)
 V : 유속 (m/sec)
 x : 수평방향좌표 (m)

y : 수직방향좌표 (m)

Greek Symbols

α : 열확산계수 (m^2/sec)
 Γ_ϕ : 확산계수 (diffusion coefficient)
 μ : 점성계수 ($kg/m.sec$)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)
 ϕ : 일반종속변수 (general dependent variable)

1. 서 론

*정회원, 한국에너지기술연구소
**정회원, 생산기술연구원
***정회원, 서울대학교 기계공학과

최근 국내 전력에너지 수요가 증가하고 주·야간의 전기수급의 불균형이 심화됨에 따라 최대부하

시간대에 발전설비용량이 한계수위에 달하고 있다. 따라서 그 해결책의 일환으로 심야시간대에 전기를 열에너지로 변환하여 축열하였다가 주간의 최대부하시에 사용하는 축열식 열저장기기의 개발 및 사용이 적극적으로 검토, 추진되어야 할 시점에 와 있다.

전기온수기나 전기보일러 안에서의 온도계층화는 물의 온도변화에 따른 밀도차이로 인하여 유체 스스로 윗부분에는 온수가 모이고 밑에는 냉수가 위치하여 유체가 안정된 상태를 유지함을 의미한다. 따라서 온도계층화가 이루어진 탱크내에서는 열의 대류가 일어나지 않고 단지 온도변화가 있는 온도 경계층에서 상하로 열전도만 일어난다. 온도계층화의 필요성은 축열(방열)효율 또는 상대적 유효에너지(exergy)의 개념으로 설명된다. 즉 사용하는 에너지에도 질(質)이 있으며 밀도가 높은 에너지를 공급할 수 있는 에너지가 고급 에너지이다. 일반적으로 일정량의 전기에너지가 온수기나 보일러에 투입되었을 경우에 가능하면 최대한 높은 온도의 물의 양이 많은 상태가 상대적으로 많은 유효에너지를 갖는다. 예를 들면 100l 용량의 온수기가 85℃ 까지 축열된 후 15℃의 시수가 유입될 때 완전 혼합되면, 25l 사용 후 출구온도가 70℃, 50l 사용 후 출구온도는 50℃, 75l 사용 후에는 32.5℃와 같은 유형으로 점차 내려감을 알 수 있다. 그러나 완전한 온도계층화가 이루어질 경우에는 물의 온도혼합이 전혀 없다고 하면 100l 사용시까지 85℃의 물을 계속 사용할 수 있게 된다. 따라서 이 경우에는 축열조에 주어진 용량의 에너지를 최대한 유용하게 사용할 수 있게 된다.

본 연구에서는 전기 온수기 또는 보일러의 성능 향상과 관련하여 수축열조의 온도계층화 특성을 열 및 유체의 유동에 관한 전산 수치해석과 흐름 가시화(flow visualization) 실험을 통하여 조사하고자 하였다.

2. 수치해석

2.1 수학적 모델

이론해석을 위한 수학적 모델은 Fig. 1과 같다. 즉 축열조는 실제 온수조의 형태와 유사한 원통형 용기로서 반경은 0.285 m이며 중심부에서의 높이는 1.3 m, 원주상에서는 1.22 m이다. 한편 디퓨저는 직경 120 mm로서 상단 및 하단과 20 mm 간격

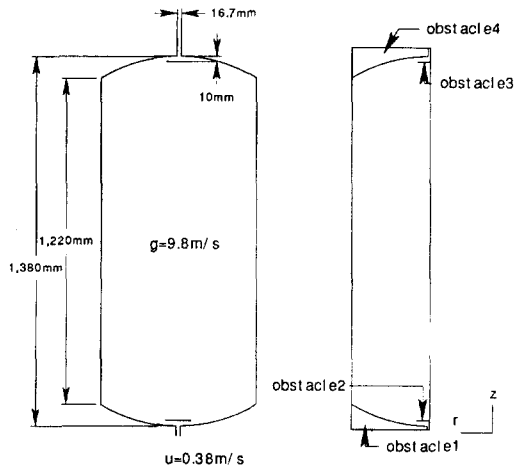


Fig. 1 Physical model of the calculation domain

으로 각각 설치된다. 축열조는 초기에 85℃의 물로 채워져 있으며, 중앙 하단부로부터 냉수가 0.38 m/sec의 속도로 유입되어 디퓨저에 의해 반경으로 퍼진 후 상단으로 이동한다. 원통의 벽면과 디퓨저는 모두 단열되고 있다고 가정하고, 유체의 흐름은 원통의 직경을 특성길이로 한 레이놀즈수가 약 50 정도가 되기 때문에 층류흐름으로 가정하였다. 해석영역은 대칭면인 원통의 중심선을 기준으로 한쪽 부분만 선택하였으며, 유입 및 유출경계면에서 계산상 질량 유속이 같아지도록 적정길이의 파이프를 포함하였다.

2.2 좌표계 및 지배방정식

Fig. 1과 같이 곡면부를 포함하고 있는 해석영역은 곡선경계면을 비교적 단순한 기하학적 형상으로 가정하여 계산하거나 직교좌표계를 사용하면서 경계조건을 보간하여 계산하는 방법이 있으나, 이는 해의 정확도가 떨어지므로 최근에는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 좌표변환에 의한 수치해석 방법이 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 지배방정식을 일반좌표계로 변환시켜 Fig. 2와 같이 좌표계가 원통면에 부착되도록 하였으며, 여기서 y^1, y^2 는 원통좌표계를, x^1, x^2 는 일반좌표계를 각각 나타낸다. 또한 공간상에서 방향이 변하지 않는 속도성분 U_r, U_z 를 사용하여 좌표계를 일반좌표계로 변환시켰으며, 점성에 의한 소산 및 압력에 의한 압축성효과를 무시한 비압축성, 뉴턴유체의 비정상 2차원 층류 혼합대류에 대

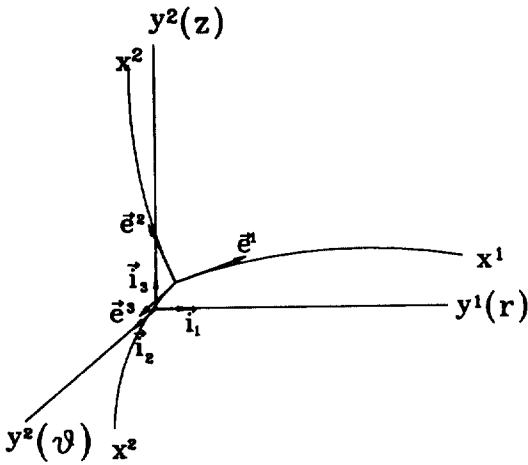


Fig. 2 Cylindrical coordinate and generalized coordinate

한 지배방정식을 벡터형태로 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + (\rho \vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \rho \vec{F} - \nabla p + \nabla \cdot (2\mu \vec{D}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + (\rho \vec{V} \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (\rho \alpha \nabla T) \quad (3)$$

여기서 \vec{F} 는 중력가속도이고, \vec{D} 는 변형율 텐서를 나타낸다. 상기 식을 일반 좌표계로 변환시켜 텐서 형식으로 나타내면 다음과 같다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{gr}} \frac{\partial}{\partial x^j} (\rho r U_m \beta_m^j) = 0 \quad (U_1 = U_r, U_2 = U_z) \quad (4)$$

운동량방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{1}{\sqrt{gr}} \frac{\partial}{\partial x^j} (\rho r U_m U_i \beta_m^j) = & -\frac{1}{\sqrt{gr}} \\ \frac{\partial}{\partial x^j} (pr \beta_i^j) + \frac{1}{\sqrt{gr}} \frac{\partial}{\partial x^j} \left[\frac{\mu r}{\sqrt{g}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x^n} \beta_m^n \right. \right. & \\ \left. \left. + \frac{\partial U_m}{\partial x^i} \beta_m^j \right) \beta_m^j \right] + \rho g_i \quad (g_1 = 0, g_2 = -g) & \quad (5) \end{aligned}$$

에너지방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho T) + \frac{1}{\sqrt{gr}} \frac{\partial}{\partial x^j} (\rho r U_m T \beta_m^j) = \frac{1}{\sqrt{gr}} \frac{\partial}{\partial x^j} \left(\frac{\rho \alpha r}{\sqrt{g}} \frac{\partial T}{\partial x^m} \beta_m^j \right) \quad (6)$$

여기서 β_m^j 는 $\beta_m^j = \sqrt{g} \frac{\partial x^j}{\partial y^m}$ 으로 정의 되었으며 $\rho U_m \beta_m^j$ 의 물리적 의미는 x^j 좌표계에 수직한면을 통과하는 질량유량을 나타낸다. 또한 \sqrt{g} 는 좌표 변환에 따른 체적 변화, 즉 Jacobian을 나타내며, $\sqrt{g} r dx^1 dx^2$ 는 물리적 영역에서의 체적을 나타낸다.

2.3 유체의 열물성치

본 연구에서 계산된 물의 온도범위는 15°C ~ 85°C 이므로 유체의 열물성치가 일정하다고 볼 수 없다. 특히 밀도의 경우에는 초기 단계에서부터 디퓨저에 의해 성층화가 이루어지면서 짧은 구간에서 밀도구배가 급격히 증가하므로 열팽창계수에 의해 밀도변화를 나타내게 되면 같은 온도 범위에서 밀도변화가 작아짐으로 인하여 부력의 크기가 작아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 Boussinesq 가정을 사용하지 않고 밀도와 점성계수를 온도의 함수로 주고 계산하였으며, 열확산계수는 일정한 것으로 가정하였다. 대기압하에서 밀도, 점성계수 및 온도와 의 관계는 참고문헌⁽¹⁾에서 인용하였다.

2.4 격자생성

격자는 Haber et al⁽²⁾의 방법에 이용하여 비직교 격자를 생성하였는데, 이 방법은 모든 경계면에서의 셀(cell) 정점에 대한 좌표값을 주고 보간법에 의해 내부의 격자점을 생성시킨다. 일반 좌표계에

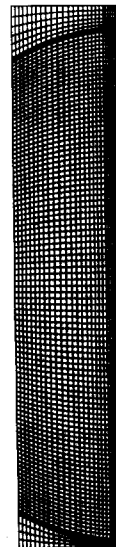


Fig. 3 Non-orthogonal mesh configuration (118×31)

서 계산을 수행할 때 계산격자는 해의 정확성 및 계산과정의 안정성을 만족시키기 위해 가급적이면 격자를 직교하도록 만들어 교차미분항의 영향을 줄이고 격자의 중형비를 작게하여 계수의 크기를 고르게 만들어 주어야 한다. 본 계산에서는 격자가 심하게 찌그러지는 것을 방지하고 유동장 내부의 디퓨저를 장애물로 처리하기 위해서 해석영역을 7개의 보조영역으로 나누어 1번째 보조영역에서 7번째 보조영역까지 순차적으로 격자를 생성시켰다. 이러한 방법은 운동량방정식이나 에너지방정식 등에서 나타나는 격자의 비직교성이 적어지고 격자의 찌그러짐의 효과를 줄일 수 있기 때문에 해를 구하는 과정이 보다 안정되고 수렴속도를 증가시킬수 있는 장점이 있다. Fig. 3은 이 방법에 의해 생성된 비직교 격자를 나타낸다.

2.5 수치근사

본 연구에서 수치계산은 비직교 격자선에 의해 둘러싸인 영역을 제어체적으로 정의하고 지배 미분방정식을 이 제어체적에 대하여 체적적분을 수행함으로써 이산화시키는 유한체적법(finite volume method)⁽³⁾을 사용하였다. 따라서 앞에서 유도된 지배방정식은 일반적으로 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\begin{aligned} \sqrt{gr} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x^j} (\rho r U_m \phi \beta_m^j) \\ = \frac{\partial}{\partial x^j} \left(\frac{\Gamma_{gr}}{\sqrt{g}} \frac{\partial \phi}{\partial x^n} \beta_m^n \beta_m^j \right) + \sqrt{gr} S_\phi \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 왼편의 첫번째항과 두번째항은 각각 시간항과 대류항을 나타내며, 오른편은 확산항과 생성항을 나타낸다.

본 연구에서는 대류항의 계산을 위하여 상류도식(upwind scheme)과 하이브리드도식(hybrid scheme)을 사용하였으며, 그 결과를 상호 비교하였다. 한편 확산항은 격자의 비직교성에 무관한 정규 미분항과 격자의 비직교성으로 인해 나타나는 교차 미분항이 존재하는 데, 이때 정규 미분항은 보간과정에서 주변계산점(E, W, N, S)의 값을 필요로 한다. 그러나 교차 미분항은 주변계산점 뿐 아니라 외곽계산점(NE, NW, SE, SW)에서의 ϕ 값을 필요로 하게 되어 구성된 계수행렬이 9개의 대각행렬에서 0이 아닌 값을 갖게 되므로 Stone⁽⁴⁾이 제시한 SIP(strongly implicit procedure)방법을 적용하

였다.

또한 본 계산은 비엇갈림 격자(non-staggered grid)제를 사용하여 2단계 수정과정을 거치는 PISO 알고리즘⁽⁵⁾을 적용하였으며, 계산절점에 대해 이산화된 운동량방정식을 제어표면에서의 속도에 대한 보간식으로 사용함으로써 압력구배를 중심 계산절점에서의 값으로 나타내어 압력과 속도를 연결시키는 방법을 택하였다. 따라서 이와 같은 방법을 사용하게 되면 진동하는 압력장에 대해서도 압력구배항은 0이 되지 않으며, 이 속도성분을 사용하여 제어표면에서의 질량유량을 구하면 제어체적에 대한 연속방정식을 만족하지 않고 질량오차를 남기게 된다. 따라서 이를 이용하여 속도 및 압력을 수정하였다.

수렴의 판단은 일반적으로 대수방정식의 최대 잔류오차값이 허용오차 이내로 되도록 정하고 있으나 저속유동인 경우에는 정확한 수렴해를 기대할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 최대 잔류오차 이외에 계산격자내의 임의의 관측점에서 종속변수값에 대한 매 반복시행당의 변화율이 허용한도 이내에도달했을때 수렴된 것으로 판단하였고, 이때 허용오차는 1.0×10^{-3} 으로 설정하였다.

2.6 초기 및 경계조건

초기에 축열조내에는 온도가 85°C 인 물로 채워져 있고 유동은 없는것으로 가정된 상태에서 $\delta t = 1$ sec에서의 해를 구하고 이것을 초기조건으로 주고 계산하였다.

(가) 속도 경계조건

축열조 하단 입구에서 투입되는 냉수의 유속은 0.38 m/sec 이며, 벽면에서 점착조건을, 대칭면에서는 대칭면의 수직방향의 속도구배를 0으로 주었다. 또한 원통 윗면에서 충분히 떨어진 파이프에서의 유속은 z방향으로 완전히 발달한 유동 조건을 주었다.

(나) 온도 경계조건

입구에서의 온도는 15°C 로 주고 원통벽면을 포함하여 디퓨저 벽면에서는 모두 단열조건을 적용하였으며 출구온도는 완전히 발달한 온도분포를 갖는다는 조건($\nabla T = 0$)을 적용하였다. 또한 대칭면 및 벽면 그리고 장애물 벽면에서의 단열조건은

$$q_w = \frac{\Gamma_T C_p}{\delta V \Delta A_w} \left[(\delta T)^2 D_2^2 - (\delta T)^1 D_1^2 \right]_w = 0 \quad (8)$$

이고

$$T_s = T_p - (T_{sc} - T_{sw}) \frac{D_{is}^2}{D_{zs}^2}$$

로 단열면에서의 온도를 외삽하여 구하였으며, 계수 $a_s=0$ 으로 주고 생성항내의 교차미분항을 0으로 주었다. 여기서 $D_i = \beta_m^i \beta_m^i$ 로 정의 되었다.

(다) 압력 경계조건

경계면에서의 압력수정은 필요 없으므로 경계면에서의 계수를 0으로 주었다.

(라) 장애물처리 및 경계조건

장애물의 내부에서는 유동이 없으므로 장애물 내부의 계산점에 대해서는 생성항, $S = S_u + S_p$ 에서 $S_u=0$, $S_p=10^{80}$ 으로 주어 처리하였으며, 벽면에서의 속도 경계조건은 장애물 벽면으로부터 첫번째 계산 격자점까지의 수직거리를 계산하여

$$S_w = \tau_w \delta A_w = \frac{\mu U_s}{\delta n} \delta A_w \quad (9)$$

$$a_s = 0$$

이 되도록 처리하였다. 한편 장애물의 단열벽면조건은 장애물 벽면에서 첫번째 계산 격자점에서의 계수를 0으로 처리하고 교차미분항을 0으로 주어 장애물 벽면에서의 확산이 없도록 하였다.

3. 계산결과 및 고찰

원통형 축열조 하단으로부터 15°C의 냉수가 0.38 m/sec의 속도로 유입될 때 시간에 따른 열적 성층화 진행과정을 계산하였다. 계산은 Alliant 컴퓨터를 이용하여 81×31 격자에서 상류도식과 하이브리드도식을 상호 비교하였고, 118×31 격자에 대해서는 하이브리드도식을 사용하였다. 900초까지 시간을 진행시키는데 소요된 계산시간은 개략적으로 81×31격자에 대하여 1주일, 118×31 격자에서 10일 정도가 소요되었다. 혼합대류 문제의 경우 시간증분 δt 는 최적값이 존재하며, 그 최적값은 시행착오 (try-and-error)를 통해 얻었다. 따라서 본 연구에서는 δt 의 최적값은 81×31 격자에서 2초, 118×31 격자에서 1초임을 알았으며, δt 가 증가하게 되면 속도장이 매 반복시간당 심하게 진동하게 되어 수렴속도를 현저히 저하시키는 것으로 나타났다. 그러나 위에서 설정된 δt 에서도 속도장 및 압력장은 어느 정도 요동하면서 수렴해 나가기 때문에 여기서는 가상의 생성항을 계수에 더해줌으로써 요동없이 빠른 수렴속도를 얻는 방법을 사용하였다. 즉

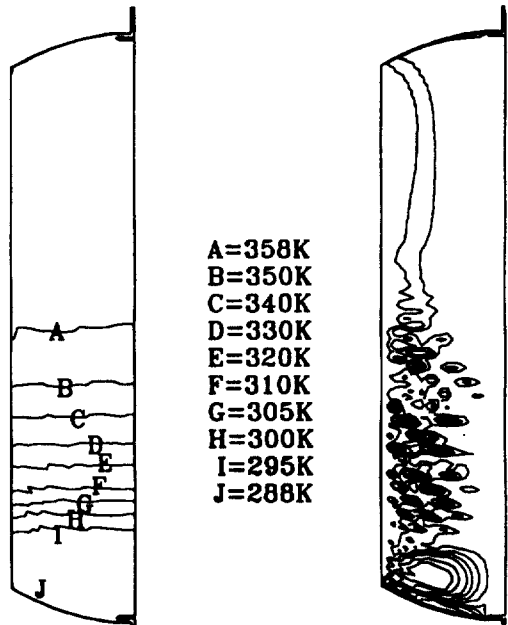


Fig. 4 Cantour lines of calculation results using the vpwind scheme at t=120 sec (left : isothermal line, right ; streamline)

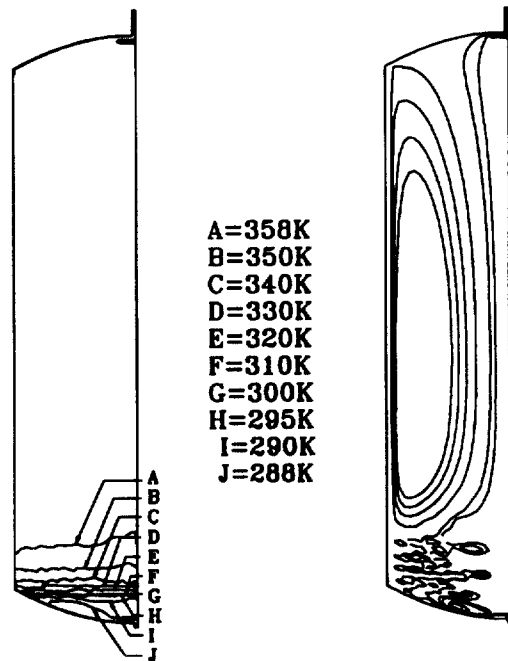


Fig. 5 Cantour lines of calculation results using the hybrid scheme at t=120 sec (left : isothermal line, right ; streamline)

$$S_\phi = S_\phi + \rho_0 g \delta V \phi_p$$

$$C_p = C_p + \rho_0 g \delta V \quad (10)$$

Fig. 4~Fig. 7은 계산결과 나타난 등온선 및 유

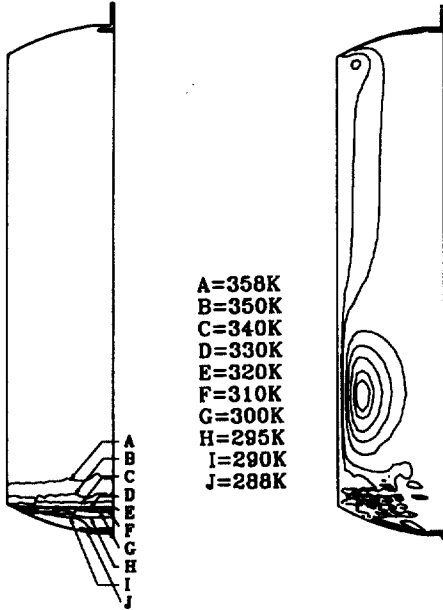


Fig. 6 Cantour lines of calculation results using the upwind scheme at $t=900$ sec (left : isothermal line, right ; streamline)

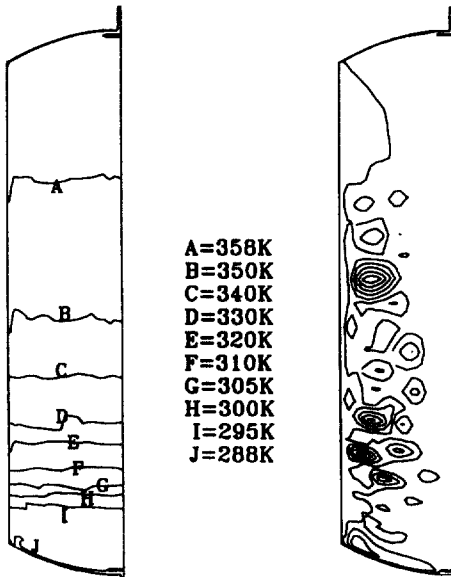


Fig. 7 Cantour lines of calculation results using the hybrid scheme at $t=900$ sec (left : isothermal line, right ; streamline)

선을 그린 것이다. 여기서 Fig. 4는 $t=120$ sec일 때 상류도식에 의한 결과이고, Fig. 5는 하이브리드 도식에 의한 결과이다. 먼저 계산에 앞서서 행한 초기의 시도는 Boussinesq 가정을 사용하여 국소적인 밀도 변화를 작게 예측함으로써 초기단계에서부터 넓은 범위에 걸쳐 성층화가 이루어진 결과를 얻었다. 즉 그림에서 보면 원통 축열조내에서 온도 성층화는 디퓨저로 인하여 초기단계에서부터 이루어짐을 알 수 있다. 여기서 주목할만한 점은 예측된 유동장이 열적 성층화가 이루어지는 영역에서 매우 불규칙하고 불안정하다는 것이다. 그러나 이러한 현상은 국소적 밀도값이 매우 작은 구간에서 어림수 오차(round-off error)로 인하여 차이가 날 수 있고, 매우 작은 밀도 차이가 원통내부의 저속유동에 결정적으로 영향을 주기 때문에 발생하거나 또는 유동장 자체의 성질일 것으로 판단되었다.

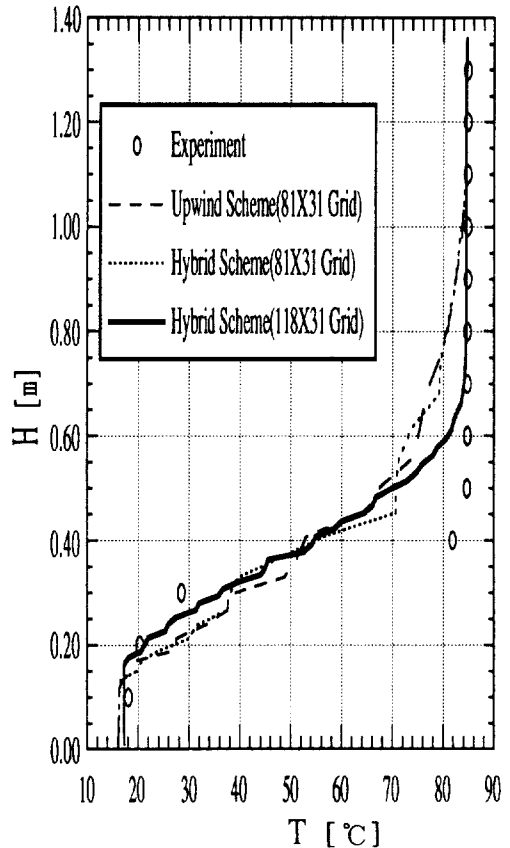


Fig. 8 Cantour lines of calculation results using the hybrid scheme at $t=180$ sec

Hayden⁽⁶⁾은 직사각형 밀폐공간내에서 혼합대류 문제를 Boussinesq 가정을 사용하지 않고 계산한 결과 똑같이 불규칙적인 속도장을 얻었는데, 이는 대류항이나 확산항에 대한 보간법 등을 세심하게 검토해 보고 점성계수나 밀도중 어느 하나를 온도의 함수로 주지않고 반복계산한 결과 나타난 유동장 자체의 열적특성이란 결론을 내린바 있다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 $t=900\text{sec}$ 일 때의 상류도식과 하이브리드도식의 결과를 나타낸 것이다. 상류도식의 결과는 비교적 넓은 범위에서 성층화가 이루어지고 있음을 볼 수 있으나, 조밀한 격자에서 계산한 하이브리드도식의 결과는 성층화가 보다 짧은 구간에서 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8~Fig. 11까지는 축열조의 대칭축에 따라 계산된 결과와 실험결과(시판 온수기에 대한 성능

측정 결과)를 비교한 것이다. 계산결과는 초기단계에서 비교적 실험치와 잘 일치하고 있으나 시간이 경과함에 따라 점차 온도구배가 떨어지는 것을 알 수 있으며, 또한 계단 모양의 결과가 나타나고 있다. 이는 수치확산이나 제어 표면에서 종속변수의 값을 선형 보간에 의해 구하기 때문으로 생각되며, 대칭축 근방에서 격자의 큰 종횡비로 인하여 z축 방향으로의 연결성이 그만큼 떨어지기 때문에 나타나는 현상으로 해석될 수도 있다. 그러나 $t=420\text{sec}$ 까지는 온도구배가 꾸준히 떨어지나 그 이후부터는 온도구배가 거의 일정한 상태로 되는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 각기 다른 격자에서 계산한 결과를 비교분석한 것인데, 거칠은 격자에서는 수치확산에 의한 영향이 커지고 또한 선형 보간의 정확성이 떨어

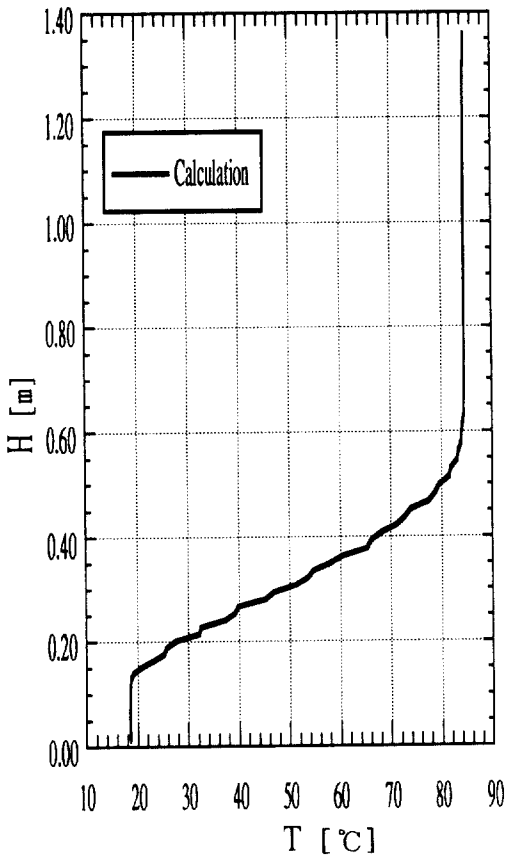


Fig. 9 Comparison of the calculation results using the hybrid scheme with the experiment (at $t = 420\text{ sec}$)

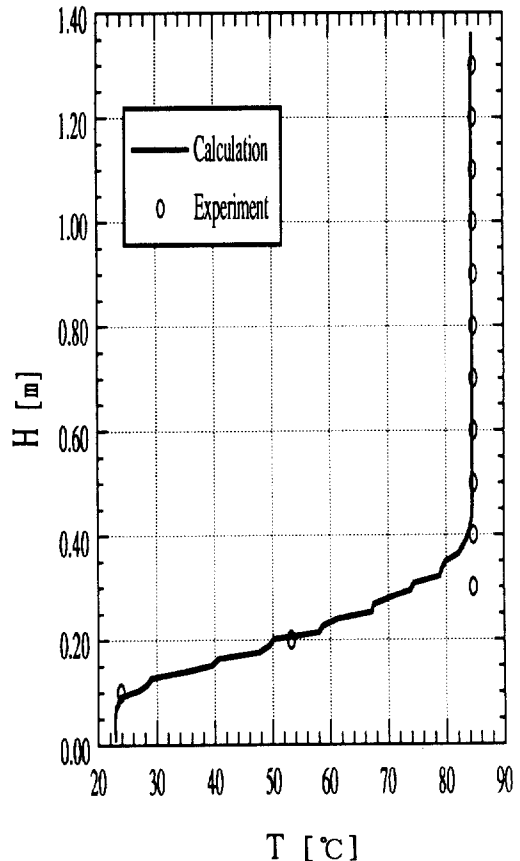


Fig. 10 Calculation result using the hybrid scheme(at $t = 720\text{ sec}$)

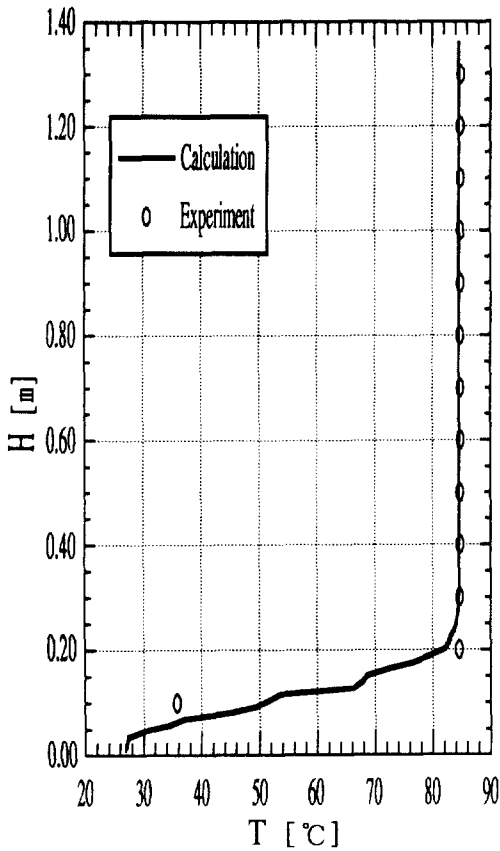


Fig. 11 Comparison of the calculation results using the upwind scheme and hybrid scheme with the experiment (at $t=900$ sec)

어지므로 실험치와 많은 오차를 보이고 있다. 따라서 격자수를 증가시키면 더 정확한 결과가 예상된다. 계산시간이 길어지고 수렴성이 떨어지므로 이러한 방법보다는 고차 보간방법이나 수치확산을 줄이는 방법이 필요할 것으로 판단된다.

4. 계층화 실험

축열조내에서디퓨저가 온도경계층에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 흐름가시화 실험을 수행하였다. 온도경계층의 형태 및 움직임을 관찰하기 위하여 초기에 유입되는 시수에 염료(dye)를 주입하였으며, 이를 디퓨저가 있는 경우와 없는 경우에 대해서 각각 비교, 분석하였다.

(가) 실험장치

디퓨저에 의한 온도경계층 형성을 가시화하기 위

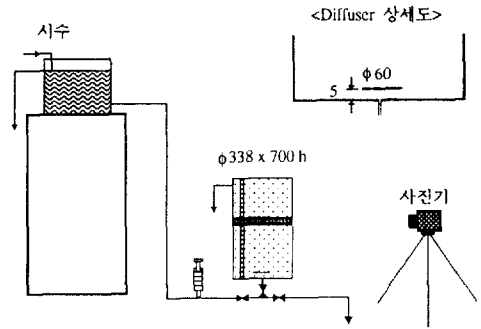


Fig. 12 Experimental set-up of flow visualization

한 실험장치는 Fig. 12와 같다. 축열조는 원통형 아크릴로 제작하였으며, 하단부 중앙의 입구에 디퓨저를 설치하여 온도경계층이 안정되게 형성되도록 유도하였다. 일정한 유량을 주입하기 위해서는 일정한 수두를 유지하는 보조 시수탱크를 설치하고 축열탱크의 하단부로부터 시수가 유입되도록 하였다. 염료의 투입은 주사기의 사용이 용이한 타이곤 튜브를 이용하였으며, 축열조 전면 1.5m 위치에는 사진기를 설치하여 온도경계층의 형성 및 이동과정을 기록할 수 있도록 하였다.

(나) 실험방법

먼저 실험을 시작하기 전에 축열조 내에 60°C의 온수를 채우고 약 5분간 방치하여 축열조내의 물의 움직임이 거의 없도록 하였다. 그후 조절밸브를 사용하여 시수가 하단으로부터 유입되도록 하면서 동시에 염료를 배관내에 주입하였는데, 염료는 붉은 색의 식염료를 시수와 혼합한 것으로 유입초기에 약 5cc 정도를 주입하였다. 주입시 주사기를 누르는 압력이 염료의 흐름방향에 미치는 영향을 배제하기 위하여 주사바늘을 시수의 유입방향과 반대방향으로 향하여 주입하였으며, 이로인한 영향은 거의 없음을 확인하였다. 한편 실험을 하기 전에 염료의 농도를 조절하여 온도가 다른 물과 접촉하였을 경우 염료의 확산이 거의 없도록 하였다. 시수의 유입유량은 1.25l/min으로 일정하게 유지되고 온도경계층이 이상적인 경우 축열조내에 시수가 가득 채워지기 위해서는 약 60분이 소요되었다. 유입초기(0~1분)에는 약 5초 간격으로, 그 후에는 약 3분간격으로 사진을 촬영하였다. 또한 사진기에는 후드(hood)를 부착하여 축광을 차단함으로써 뚜렷한 사진을 얻기위하여 노력하였으며, 디퓨저가 설치된 축열조에 대한 흐름가시화 실험을 동일한 방

범으로 반복 실시하여 일반적인 경향을 도출해 내었다.

(다) 실험결과 및 고찰

Fig. 13과 Fig. 14는 각각 디퓨저의 설치 유무에 따른 유입초기의 축열조내의 시수의 유동형태를 나타낸 사진이다. 디퓨저가 있는 경우에 유입된 시수는 반경방향으로 바닥에 넓게 퍼지면서 흐르는 중력류가 형성되고 이것이 떠를 이루어 안정된 온도 경계층을 만들고 있음을 볼 수 있다. 반면에 디퓨저가 없는 경우에는 유입된 시수가 관성에 의해 상당히 윗부분까지 도달한 후 밀도차에 의한 중력 때문에 다시 하단부로 이동한다. 그러나 이때는 벌써 온수와와의 혼합이 심하게 진행된 후로서 상당히 두터운 온도경계층이 형성되었음을 알 수 있다.

한편 Fig. 15는 시수가 유입된 후 약 25분이 경과하였을 때 디퓨저의 설치유무에 따른 축열조내부의 온도계층화를 상호 비교한 것이다. 먼저 디퓨저

가 있는 경우에는 초기에 형성된 온도계층이 거의 퇴화되지 않고 밀려 올라간 반면, 디퓨저가 없는 경우에는 유입되는 시수에 의해 혼합이 계속되어 온도 경계층이 두터울 뿐만 아니라 보다 윗부분까지 시수의 영향이 미치고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 경향은 Fig. 16에 나타난 바와 같이 시수가 유입된 후 약 50분이 경과하였을 때의 사진에서도 역시 동일한 것으로 확인되었다. 즉 디퓨저가 없는 경우에는 유입시수의 영향이 출구에 까지 미쳐 염료가 섞인 물이 출구를 통해 빠져나가기 시작하지만, 디퓨저가 있는 경우에는 염료가 혼합된 온도계층이 아직출구까지 도달하지 못하고 있는 것을 알 수 있다. 한편 디퓨저가 없는 경우에는 축열조내에 염료가 섞여 있는 물이 전체적으로 분포하는데, 이는 시수와 온수가 혼합된 물이 축열조내에 존재하는 것을 말하며 그만큼 열적 유용성이 낮다는 것을 의미한다. 반면에 디퓨저가 있는 경우에는

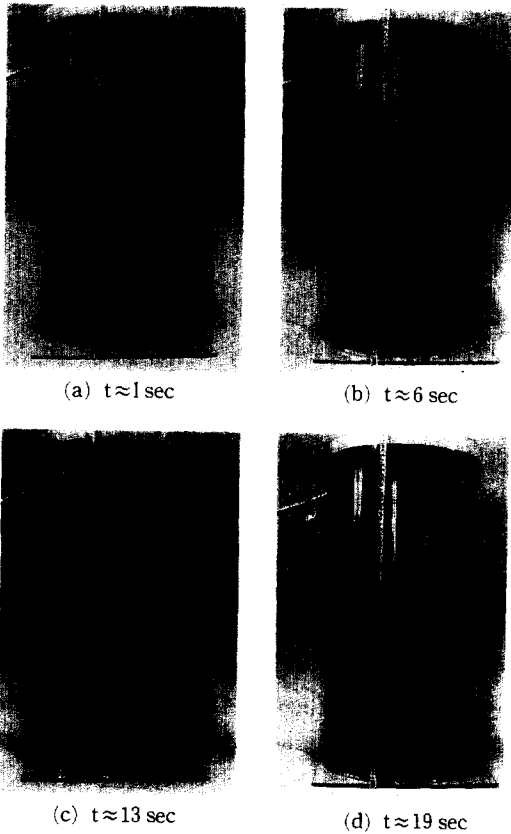


Fig. 13 Flow patterns in the storage with diffulrier (0 < t < 20 sec)

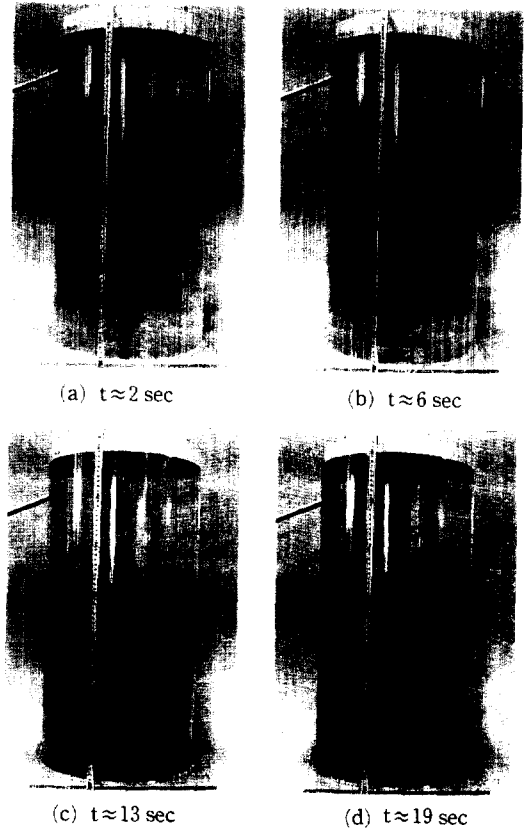


Fig. 14 Flow patterns in the storage without diffusen(0 < t < 20 sec)

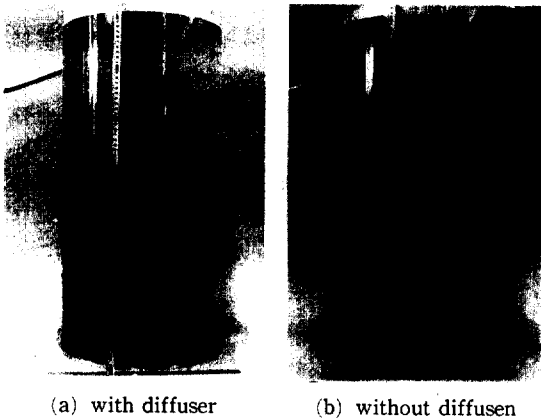


Fig. 15 Comparison of the thermal stratifications at $t=25$ mm

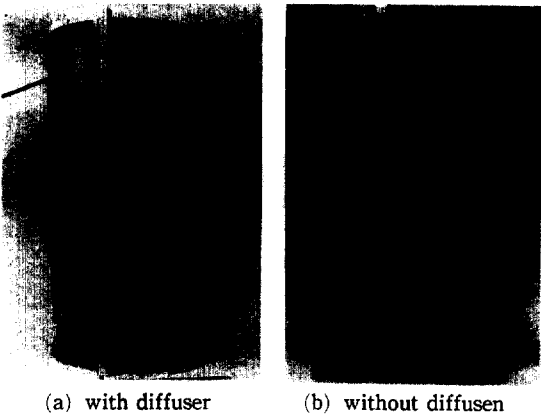


Fig. 16 Comparison of the thermal stratifications at $t=50$ min

온도경계층 하단부에서 염료가 섞인 물을 찾아볼 수 없는데, 이는 초기에 형성된 온도경계층이 충분히 안정하여 상부의 온수와 하부의 시수사이의 혼합을 방지함으로써 열적유용성을 향상시키고 있음을 의미한다.

실제로 축열조는 시수 또는 환수의 유입구가 벽면에 위치하므로 디퓨저가 없는 경우에도 본 실험에서와 같이 시수와 온수의 혼합이 극심하지 않을 수 있다. 그러나 본 실험에서 나타난 바와 같이 디퓨저를 설치한 것 보다는 그 열적 유용성이 떨어지며, 시수의 유입유량 등에 따라 또한 그 차이가 달라질 것임을 쉽게 예상할 수 있다. 따라서 실제 축열조에서 디퓨저의 설치 유무에 따른 열적 성능의 차이는 여러가지 조건에 대하여 많은 실험이 행

해져야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 수축열조의 온도계층화에 대한 2차원 층류 혼합대류 전산 수치해석과 온도계층화 현상에 대한 흐름가시화 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 수치해석 결과, 초기단계에서 축열조내부의 온도분포는 실험치와 비교적 잘 일치하고 있으나 시간이 경과함에 따라 점차 온도구배가 떨어지고 계단모양의 형태로 나타났는데, 이는 수치확산 또는 제어표면에서 종속변수의 값을 선형 보간에 의해 구하기 때문으로 판단되었다. 한편 거칠은 격자의 경우에는 수치확산에 의한 영향이 커지고 또한 선형보간의 정확성 저하로 인하여 실험치와 다소간의 오차를 보이는 것으로 나타났으며, 조밀한 격자의 경우에는 온도계층화가 향상된 결과를 보였다. 따라서 이러한 결과로부터 격자수의 증가는 보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 반면, 장시간의 전산시간 및 수렴성의 저하 등을 가져오기 때문에 고차보간법이나 수치확산을 줄이는 방법 등이 필요할 것으로 판단되었다.

2) 흐름가시화 실험결과 축열조내에 디퓨저가 없는 경우에는 시수와 온수의 혼합이 심하게 나타나는 반면, 디퓨저가 설치된 경우에는 초기에 형성된 온도경계층이 충분히 안정되어 상부 온수와 하부 시수 사이의 혼합을 방지함으로써 열적 유용성을 향상시키는 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R. L., and Sammakia, B., 1988, "Buoyancy-Induced Flows and Transport," Hemisphere Publishing Co.,
- (2) Haber, R., Shephard, M. s., a bel, J. F., Gallagher, R. H., and Greenberg, D. P., 1981, "A General Two-Dimensional, Graphical Finite Element Preprocessor Utilizing Discrete Transfinite Mapping," Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 17, pp. 1015~1044.
- (3) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill Book Company, New York

- (4) Stone, H. L., 1968, "Iterative Solution of Implicit Approximations of Multi-Dimensional Partial Differential Equations," SIAM J. Num. Anal., Vol. 5, p. 530.
- (5) Issa, R. I., Gosman, A. D., and Watkins, A. P., 1986, "The Computation of Compressible and Incompressible Recirculating Flows by a Non-Iterative Implicit Scheme, J. Comp, Phys," Vol. 62, pp. 66~82.
- (6) Hayden, N. K. and Humphrey, J. A. C., 1981, "Numerical Computation of Transient Thermocline Convection in Two-Dimensional Rectangular Enclosure," Sandia National Lab. Report 20~0183.