

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 21, No. 4, 2001

성층 축열 시스템에서의 열 저장 특성에 관한 실험적 연구

고재윤*, 김영기**, 이채문***, 임장순****

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 경기공업대학 공조냉동과

*** 유한대학 기계공학과

**** 인하대학교 기계공학과

An experimental study on thermal storage characteristics in the thermally stratified water storage system

J. Y. Koh^{*}, Y. K. Kim^{**}, C. M. Lee^{***}, C. S. Yim^{****}

* *Graduate School of Mechanical Eng., Inha University*

** *Dept. of Refrigeration & Air-Conditioning, Kyonggi Institute of Technology*

*** *Dept. of Mechanical Eng., Yuhan College*

**** *Dept. of Mechanical Eng., Inha University*

Abstract

This study describes the experimental study that focuses on the effects that distributor shapes and flow rate variations have an influence on the stratification in a rectangular thermal storage tank. Experiments were carried out under the conditions that the flow rates of working fluid are 20, 10 and 5 l/min. The storage tank is initially filled with chilled water of 1°C, and is extracted through the bottom at the same rate as the return warm water from load is entered through the distributor at the top of the tank. The thermo-cline forms at the top of the storage tank as the

warm water enters the tank from the load through the distributor and the thermo-cline thickness increases with time. Emphasis is given to the effects of mixing at the inlet that increases the thermo-cline decay. Flow rate variation and inlet distributor shapes are the important parameters in deciding the performance of a storage system. Stratification degree increases with decreasing inlet flow rate under 10 l/min. Experiments shows that better thermal stratification can be obtain using the distributor to limit momentum mixing at the inlets and outlets. Also, 12% of improvement in the thermal energy usage has been achieved using the modified distributor discharging same flow rate in each lateral ports.

기 호 설 명

- α : Thermal diffusivity
- H : Height
- T : Temperature
- U : Overall heat transfer coefficient
- u : Velocity
- Fr : Froude Number(= u^2/\sqrt{gH})
- Pe : Peclet Number(= uH/α)
- Re : Reynolds Number(= uD/ν)

하 침 자

- o : main header

1. 서 론

열성층은 축열탱크 내에 저장된 축열매질이 온도에 의한 층을 이루는 것으로 태양열 온수기 및 빙축열 시스템을 비롯한 현열과 잠열을 이용한 시스템에서 축열효율향상을 위해 중요한 고려대상이 되고 있다. 이와 같은 축열조 내에서 열성층화를 목적으로 축열조 내로 유입되어지는 유체를 분배기를 이용하여 분지하게 될 경우 단순 유입방식의 경우보다 축열탱크 내 열경계층의 유지

와 열성층 촉진에 큰 효과를 볼 수 있다.

물이 순환하는 폐회로를 구성하는 축열조 내에서 열성층화에 지배적인 영향을 미치는 인자로는 축열조 상부의 유입구 부근에서 일어나는 혼합의 정도이며 이러한 문제점을 적절히 해결하지 위해서는 여러 가지의 성층화 촉진기구를 설치할 필요가 있다.¹⁾ 열성층화 촉진의 목적으로 분배기를 사용하였을 경우 가장 이상적인 조건은 분배기의 각 분지로 동일한 유량을 분출시키는 것이다. 각 유출구의 유량 차는 축열조 내 회전류를 형성하게 한다. 또한 실제 유체의 유동 시 분지 헤더와 각 분지내의 유체 마찰손실과 직경변화에 따른 입구 손실, 출구에서의 손실 등 여러 인자들에 의해 각 유출구에서의 유속이 변화하게 된다. 이와 같이 분배기 내부에서의 유체 운동량의 변화와 관과 입구 등에서의 압력 손실과 마찰 등으로 인해 관내 유동현상의 해석이 매우 복잡하여 설계가 용이하지 않다.^{3),4)}

따라서 본 연구에서는 축열시스템의 효율을 지배하는 인자로서 유입구 형상을 단순 유입형태와 분배기를 사용하였을 경우를 각각 고려하였다. 또 각 분지로의 유량차를 고려한 변형된 분지 시스템을 사용하여 유입수의 교란을 막고 축열조 내 1차원 열유동 형성을 위해 개선된 성층화 촉진 효과를 도모하였다. 각각의 유량변화에 따른 축열조 내 온도분포와 저장된 에너지의 사용시간 및 가용에너지 정도를 실험을 통해 확인하였다. 또한

기 실시된 해석 결과²⁾와 상호 비교하였으며 성층화를 지배하는 무차원 변수들과의 상관관계를 조사하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험에 사용된 축열매질로는 물을 사용하였고, 자체 제작된 수직형 축열조 내에서 부하 측을 경과하여 들어오는 유입수의 유량(5, 10, 20 l/min)과 유량분배시스템을 변화시켰을 때 축열조에 저장된 유체의 각 지점에서의 온도분포와 성층화도 및 열경계층의 형성, 냉열 사용의 조건 등을 실험적으로 확인하였다.

실험장치에 대한 개략도를 그림 1에 나타내었다. 열성층화 실험장치의 주요부로는 1. Isothermal Storage Tank, 2. Brine Chiller 3. Cooling Chamber 4. Pump for Initial Condition 5. Pump 6. Gate Valve 7. Flow Meter 8. Flow Control Valve 9. Heat Exchanger 10. Data Acquisition System 11. Computer 12. Pump 13. Heater 14. Isothermal Chamber 등으로 이루어져 있다.

실험에 사용된 직육면체형 축열조는 외부단면

치수 1050mm×670mm×1520mm 인 스테인리스강으로 제작하였으며 전면부와 후면부는 축열조내의 관찰을 용이하게 하기 위해 가시창을 설치하였고 축열조 내 유체의 정수압과 열손실을 고려한 이중강화유리로 제작되었다. 축열조의 내부단면치수는 990mm×610mm×1460mm로 최대 882kg의 물을 저장할 수 있다. 이중 벽의 내부공간은 발포성 우레탄 단열재(0.026W/m·K)를 사용하여 단열처리하였고 축열조 외벽을 스티로폼(0.04W/m·K)을 이용하여 추가 단열처리하였다. 초기설정온도(1℃)를 평형상태로 유지하기 위해 5RT 냉동능력의 냉동기와 히터가 설치된 항온조를 사용하였고 순환배관을 모두 단열처리하였다. 항온시스템은 용량 350 l, 최고 약 80℃의 온도가 유지 가능한 자동온도 조절장치를 설치하여 시스템의 온도를 일정하게 유지하였다.

2.2 분배관 설계

열성층을 촉진시키기 위하여 분배관을 사용했을 때 이상적인 조건은 분배관의 각 출구에서 동일한 유량을 분출시키는 것이다. 그러나 실제로는 마찰손실과 main pipe 단면변화 등의 여러 인자들 때문에 각 출구에서의 유속변화가 발생하게

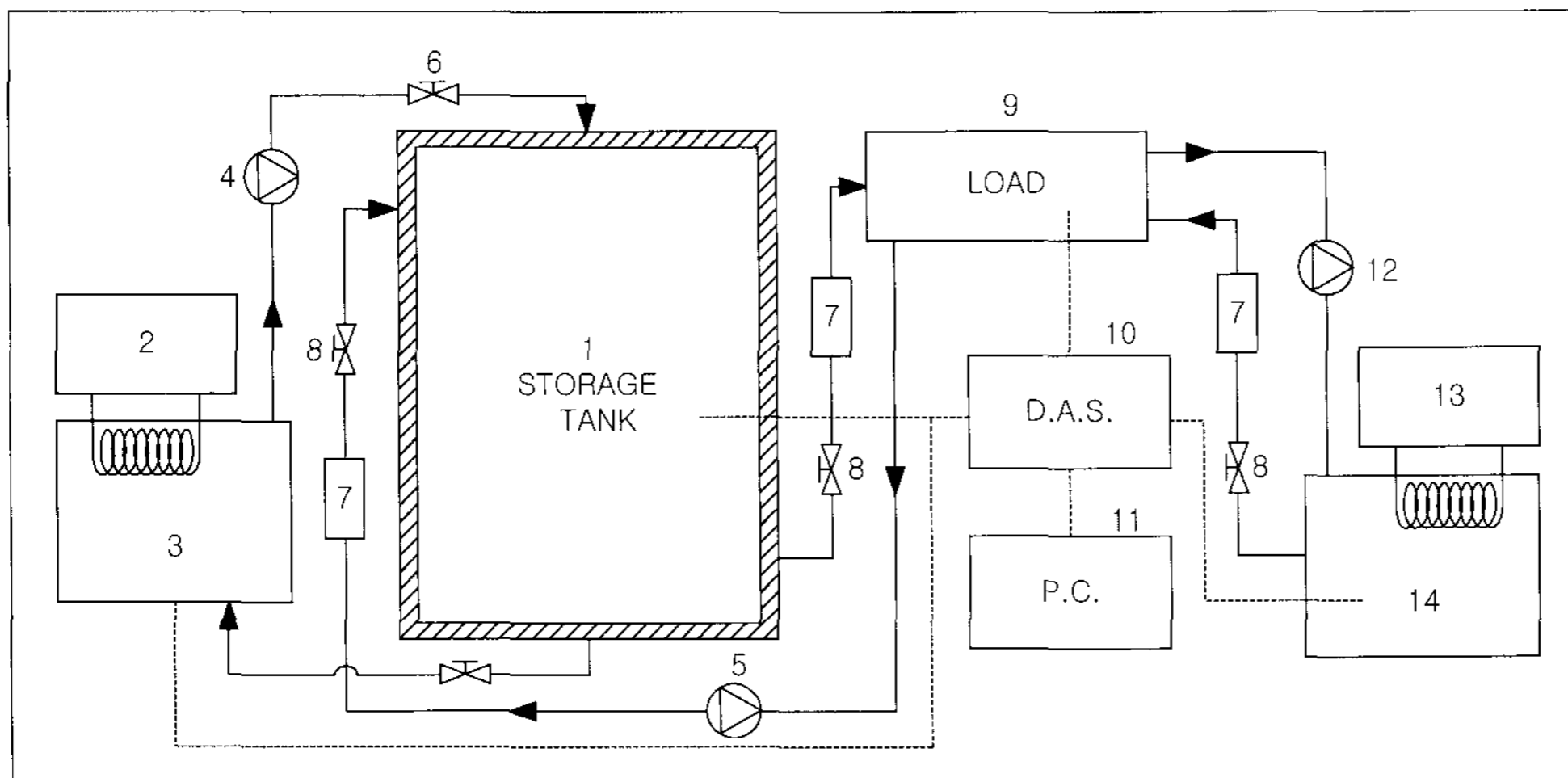


Fig. 1. Schematic of the experimental setup.

된다. 따라서 분배관 내의 전 길이에 걸쳐 동일한 유량이 분출되도록 관내의 정압을 일정하게 해야 한다. 본 연구에서는 적절한 유량분배 능력을 보유한 분배관의 제작을 위해 아래와 같은 방법으로 설계 기준을 결정하였다. 성층화 촉진기구로 사용된 분배기는 전체 길이 990mm, 내경 16mm인 PVC관으로 제작하였고 5개의 유출구를 165mm 간격으로 일렬로 위치시켰다. 먼저 유출구의 단면이 동일한 분배기를 제작 후 유입유량의 변화에 따른 각 분지로의 유량 실험결과 얻어진 data를 분석하여 유량차를 고려한 분배기를 제작하였다. 여기서 Bernoulli의 식과 Darcy-Weisbach의 식으로부터 헤더직경 D_0 에 대해 무차원화한 식(1)을 이용하였다.⁵⁾

$$\frac{D}{D_0} = \left(1 + \frac{fL}{2D_0}\right) \sqrt{x/L} - \frac{fL}{2D_0} F(x/L) \quad (1)$$

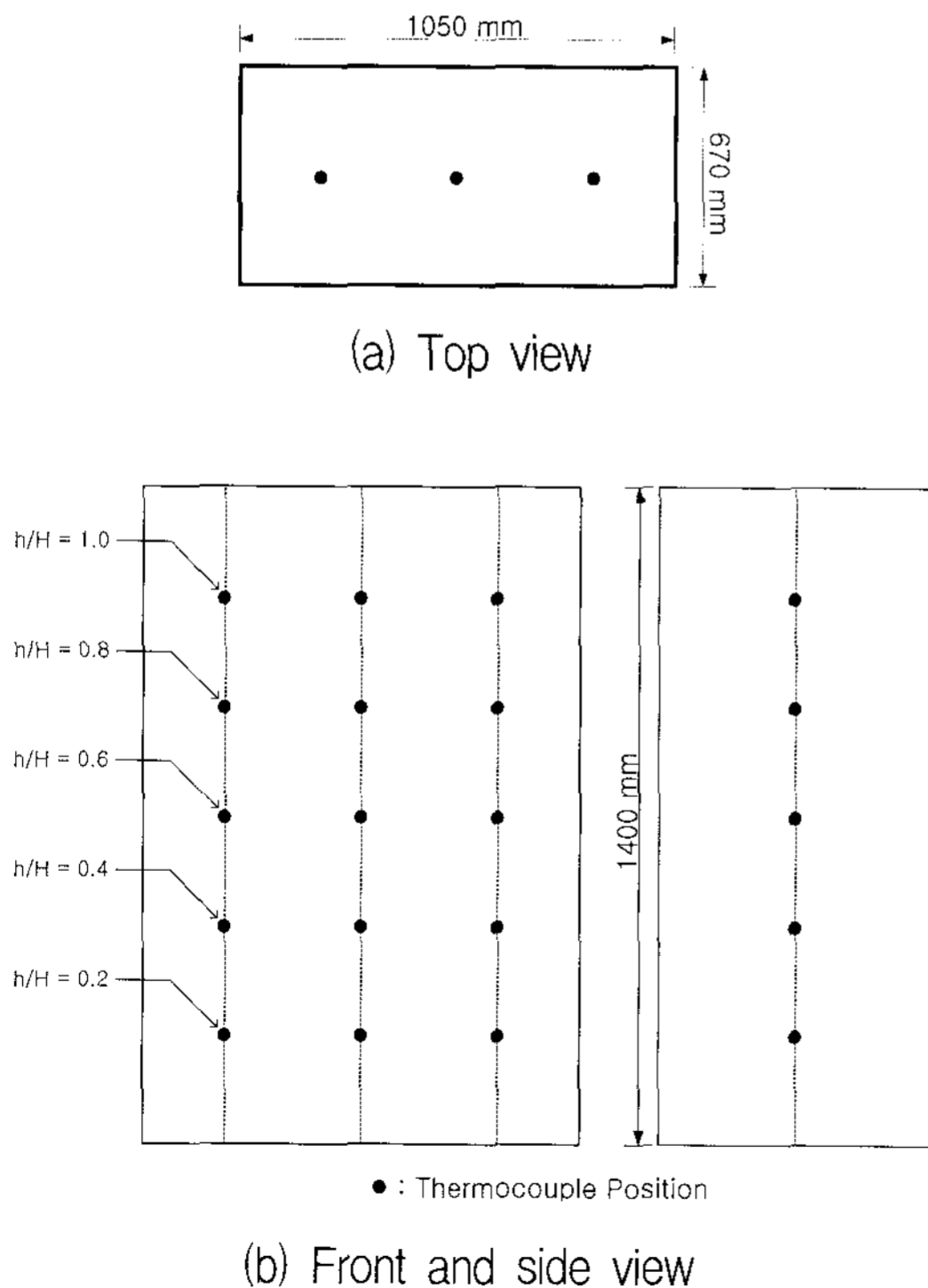


Fig. 2. Schematic of the Storage Tank.

식(1)의 파이프직경의 비를 기준으로 유출 관경의 비를 각각 순서대로 지정하고 설계한 분배관, 분배관 “B”형과 유출 측의 관경이 12.0mm로 동일한 분배관, 분배관 “A”형을 설계, 제작 그 유량의 분배 특성을 실험하여 그림 3, 4와 같은 결과를 얻었다. 유량의 측정은 Float 유량계와 초음파 유량계를 병행하여 측정하였고 각각의 측정 결과, 각 유량계간의 오차는 2~3% 범위로 유량계 자체가 보유하는 오차 범위 내에 있다.

축열조 내의 성층 특성을 고찰하기 위해 무차원 변수를 다음과 같이 정의하였다.

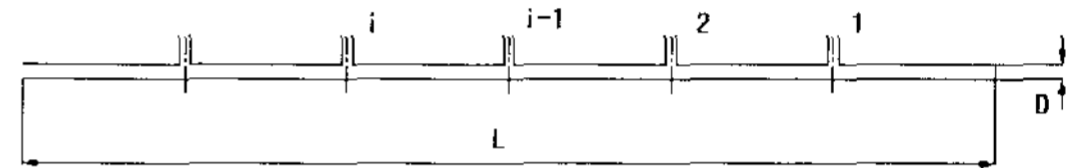


Fig. 3. Schematic of the manifold.

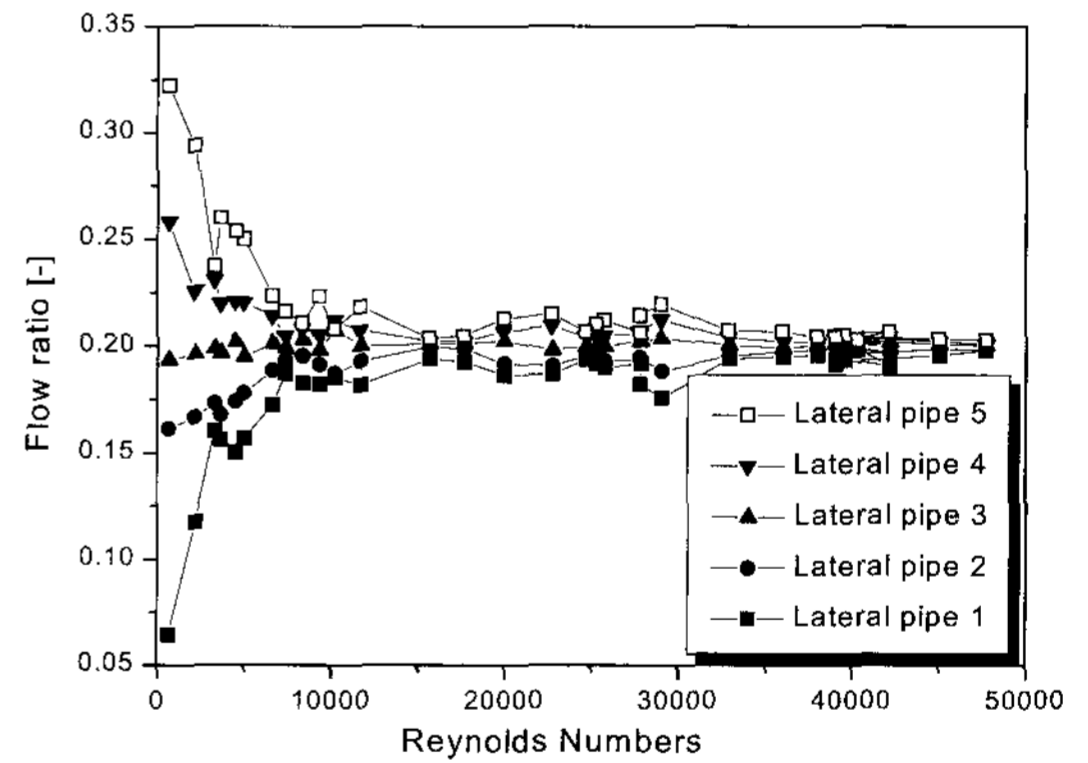


Fig. 4. Flow rate ratios using manifold “A”.

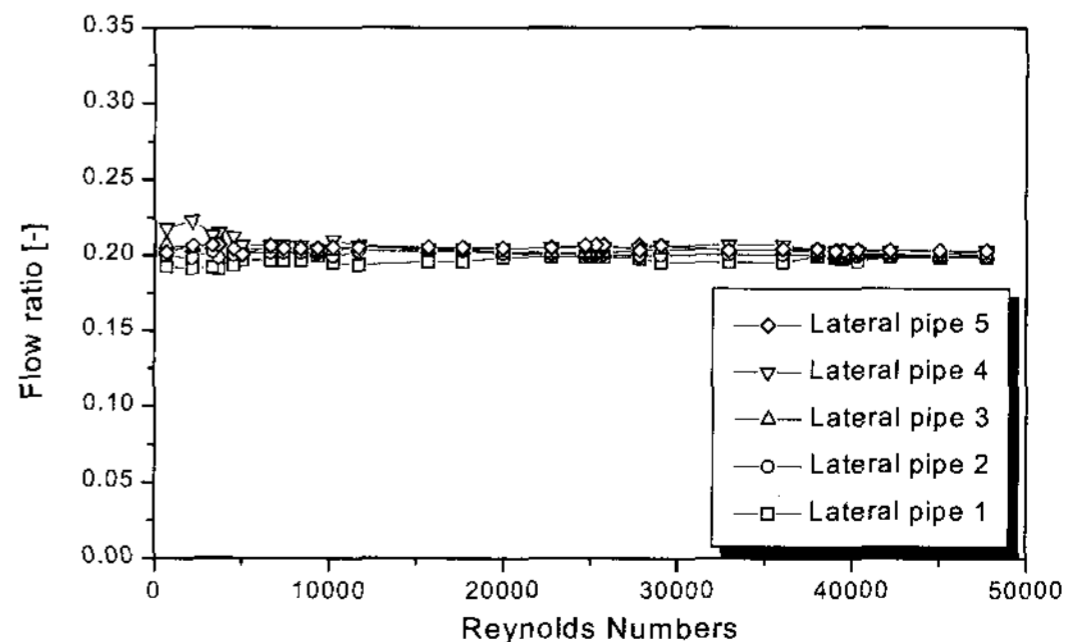


Fig. 5. Flow rate ratios using manifold “B”.

$$Pe = UH/\alpha \quad (2)$$

$$Fr_i = \frac{u^2}{(g \cdot L)} = \frac{u^2}{(g \cdot d)} \cdot \frac{1}{\frac{\Delta\rho}{\rho_0}} = \frac{u^2}{(g \cdot d)} \cdot \frac{1}{\frac{\Delta T}{T_0}} \quad (3)$$

축열조내 각 지점의 온도를 측정하기 위해 바닥면으로부터 h/w=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0의 위치에 측면으로부터 등 간격으로 세 지점에 열전대를 설치하였다. 축열조와 부하 측 입출구와 항온조에 열전대를 설치하였고 각 열전대로부터 얻어진 온도 data를 기준으로 자체 제작한 제어장치와 P.C.를 이용하여 초기조건 및 실험과정 중 시스템을 제어하였다.

2.3 실험방법

실험초기조건으로는 축열조 내에 설치된 각 열전대의 평균온도가 1°C인 초기설정온도로부터 오차범위 ±0.5°C일 때를 온도평형상태로 가정하였고 상하 측의 온도차를 줄이기 위해 유체를 순환시켜 축열조 내를 계속적으로 교반하였다. 초기조건을 온도를 유지하기 위하여 brine을 2차 냉매로 하는 5RT의 냉동기를 사용하였다. 실험은 축열조내의 유체가 초기설정온도를 유지하고 축열조 내에 관성에 의한 유동이 최소화되었을 때 시작하였다. 축열조와 항온시스템의 초기설정온도가 맞추어진 시점에서 실험을 시작하고 초기유체가 순환되는 시점에서 축열조 내 유입유량을 조절하였다. 부하 측 유체는 3 l/min으로 고정하였다. 축열조 내로 유입되는 고온의 유체는 10°C~20°C의 온도범위를 유지하도록 항온조에 설치된 히터를 이용하여 제어하였다. 축열조 출구에서의 온도가 12°C에 도달하면 실험을 종료하였다. 각 열전대에서 측정된 온도는 data acquisition system (HR 2500E, DR130, Yokogawa, Japan)을 통해

Table 1. Experimental conditions

Initial temp. of water	Flow rates of working fluid	Pe	Type of manifold
1°C	20 l/min	1.28×10 ⁷	No manifold manifold "A" manifold "B"
	10 l/min	6.41×10 ⁶	
	5 l/min	3.66×10 ⁶	

1분 간격으로 P.C.에 기록하였다.

3. 결 과

3.1 축열조 내 온도분포

그림 6~그림 9는 초기설정온도 1°C의 저온유체로 저장된 축열조 내 유체를 축열조 하부의 유체 출구를 통해 방출하고 부하를 거쳐 축열조 상부로 3가지의 형상을 갖는 분배기를 통해 각각 유입되는 경우 시간의 경과에 따라 얻어진 결과값들을 나타낸다.

동일 유입구 형상을 갖는 조건에서 열성층형성을 지배하는 인자는 유입유체의 모멘텀에 의한 혼합임을 알 수 있고 Froude수에 의해 결정적이며 Froude수 0.8~1.0 이하의 영역에서는 유속에 따라 성층화가 생성되기 시작함을 알 수 있다. 탱크의 상부로부터 생성된 열경계층은 방열과정의 말기에는 축열조의 하부로 점차 이동하며 시간이 경과함에 따라 경계층의 두께가 확장된다. 이와 같은 축열조 내 열성층 형성은 축열조 이중벽 내부에 낮은 열전도도를 갖는 우레탄재질 (0.026W/m·K)로 단열처리하였고 외부벽면에 스티로폼으로 단열처리를 하였으므로 주변으로부터의 열출입에 의한 영향이 없다고 가정할 때 축열조 내에서 발생하는 열확산과 혼합에 크게 의존한다고 볼 수 있다.

단순 유입의 경우 실험진행 전 범위에 걸쳐 Froude수 0.8~3.0인 유입유량 20 l/min, 10 l

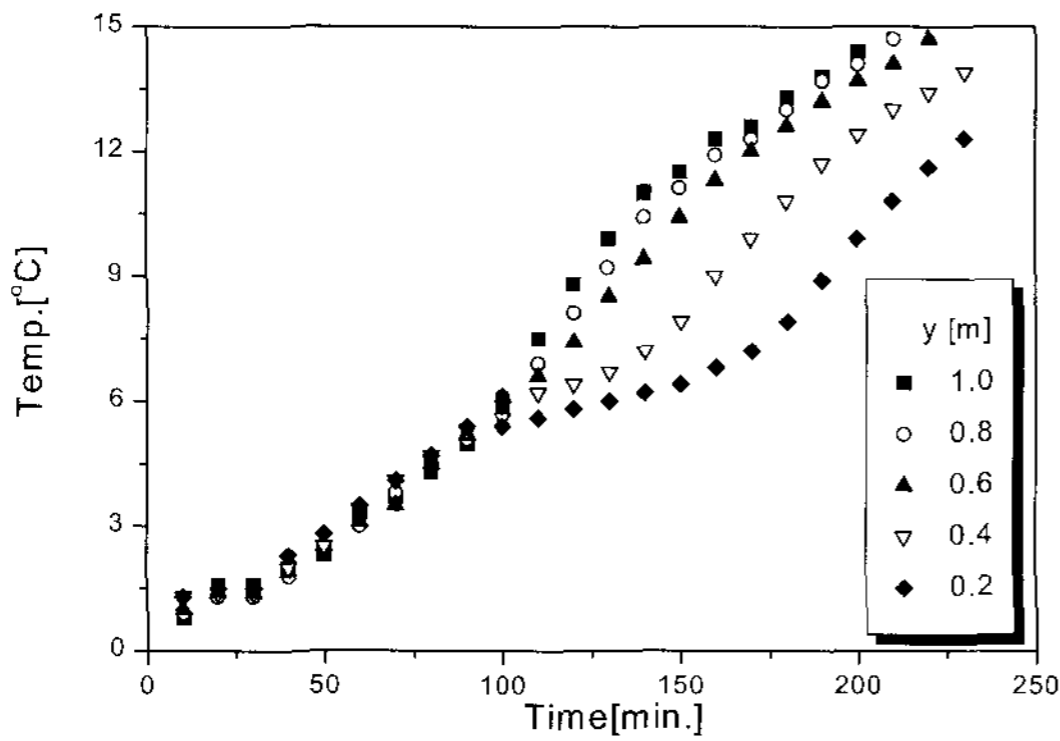


Fig. 6. Temperature variations at different heights for $Pe=3.66 \times 10^6$ without a manifold.

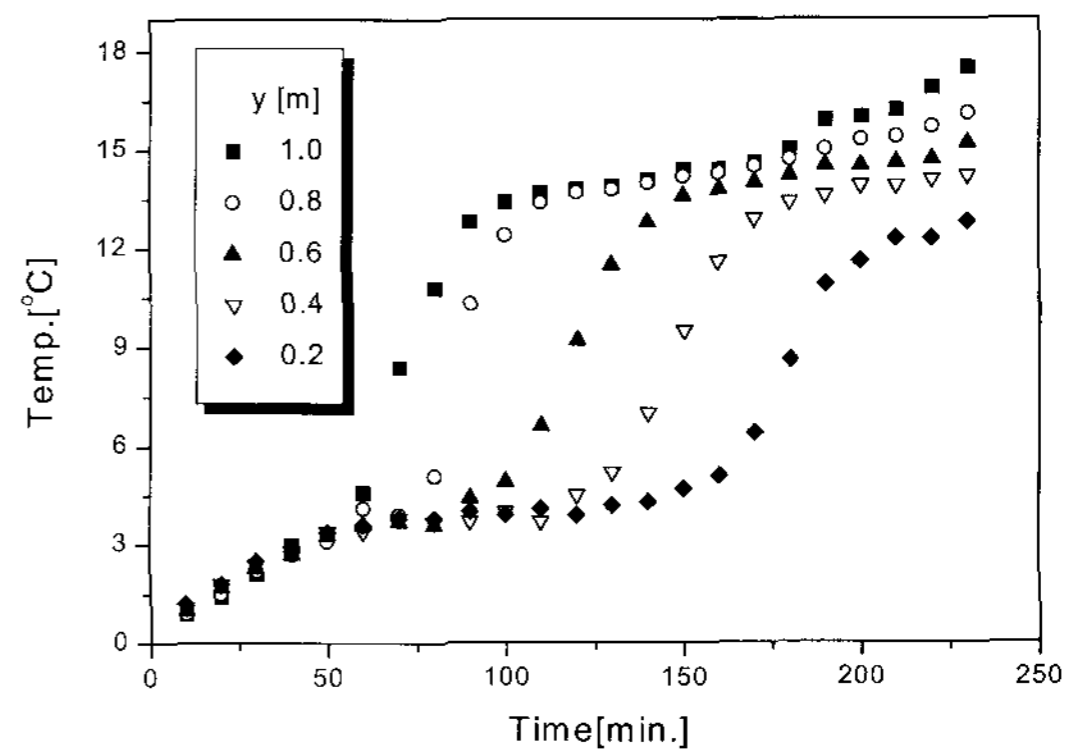


Fig. 8. Temperature variations at different heights for $Pe=3.66 \times 10^6$ with manifold "B".

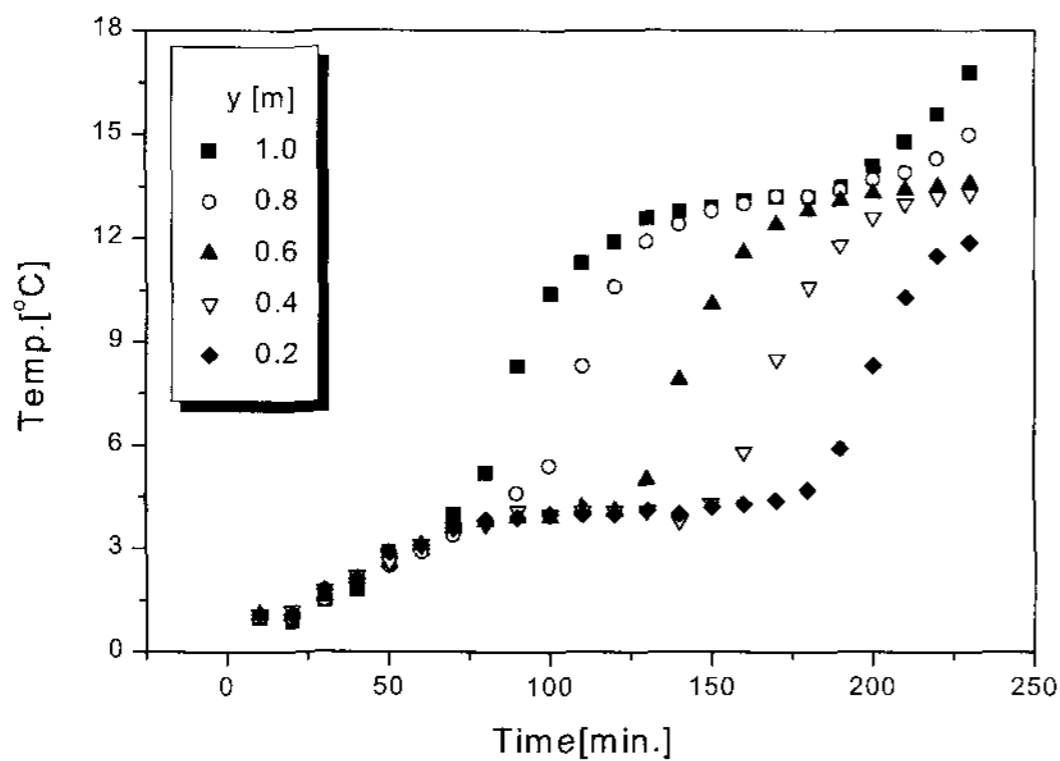


Fig. 7. Temperature variations at different heights for $Pe=3.66 \times 10^6$ with manifold "A".

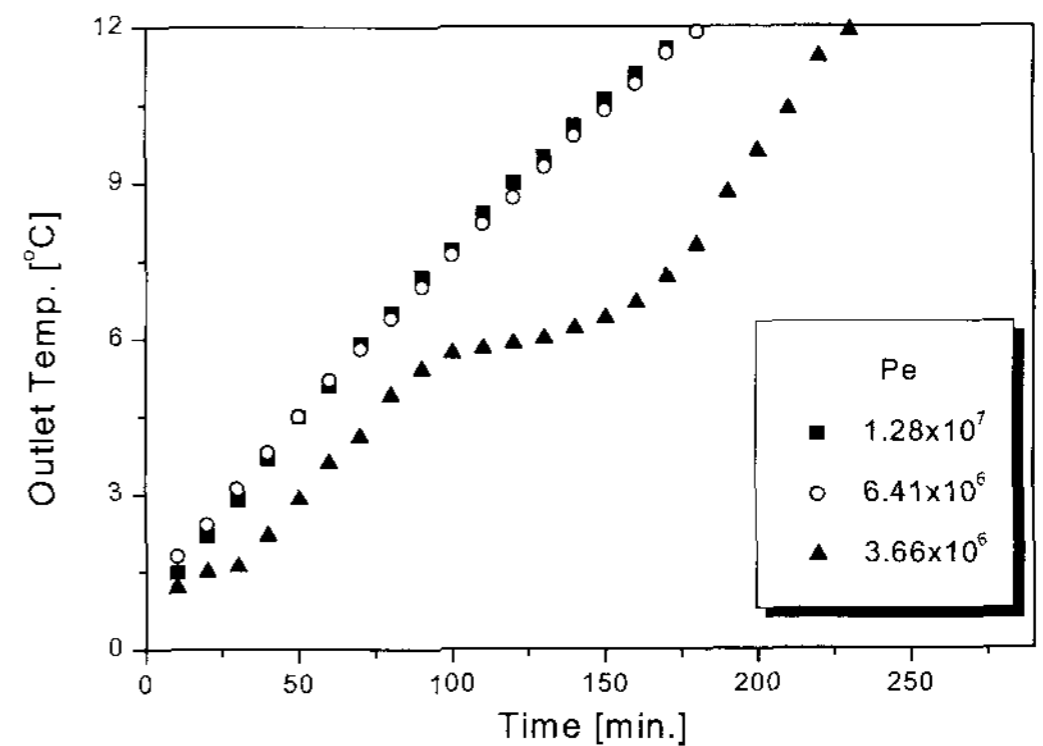


Fig. 9. Outlet temperature variations without a manifold.

/min에서는 축열조 상하 부의 혼합에 의해 열성층이 형성되지 않고 축열조 전 영역이 일정한 온도로 유지됨을 볼 수 있다.

그림 6에서와 같이 평균 Froude수 0.5 영역에 있는 5 l/min에서는 미소한 성층현상을 확인할 수 있었다. 유체를 "A"형 단순 분배관을 통해 유입할 경우 유량 10 l/min에서도 부력의 영향에 의한 성층 효과가 나타나기 시작하였다. 실험 60분 경과 후 Froude수의 감소에 따라 성층 효과를 나타냈다.

그림 7에서 유입유량 5 l/min의 조건에서는 실험경과 60분에서 급격한 성층 효과를 나타내었고, 상하측 온도차는 10 l/min에서 1.63°C, 5 l/min에서 실험종료 직전 5.3°C의 최대치를 보였다. 단순유입방식과 비교하면 "A"형 분배관을 사용하였을 경우 최대 24%의 에너지 추출성능향상을 보였다.

그림 8은 "B"형 분배기를 사용한 실험에서 시간에 따른 온도변화를 나타낸 것이다. 단순 유입방식과 비교하면 최대 약 32%, 최소 5%의 에너지추출성능의 향상을 보였다. 저유량조건에서는

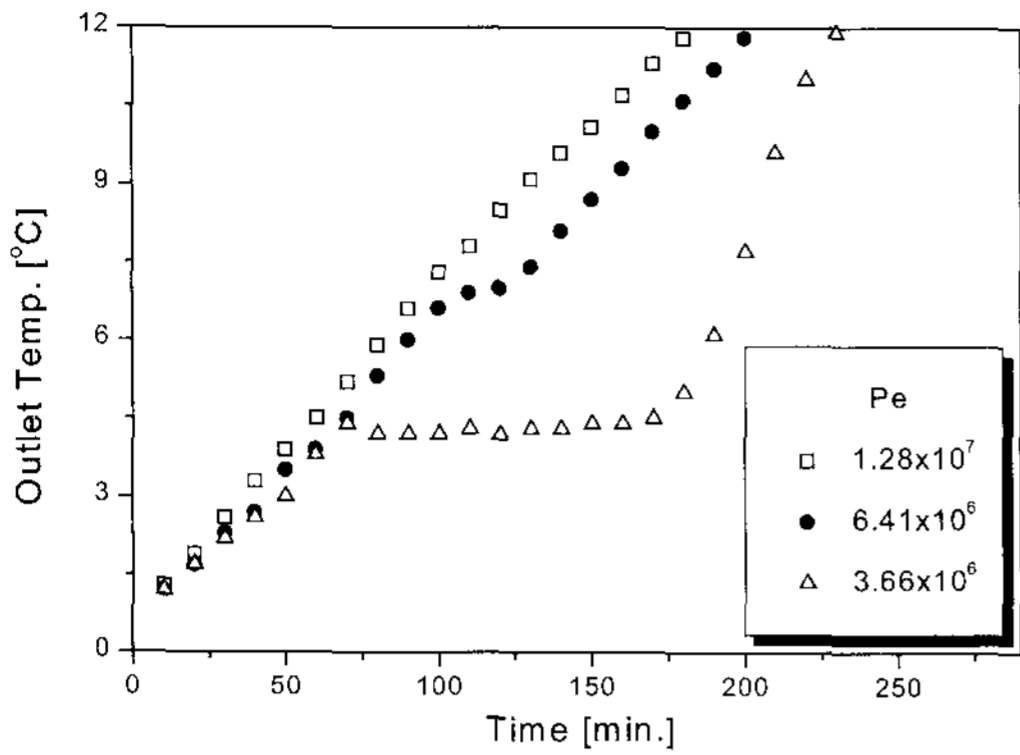


Fig. 10. Outlet temperature variations with manifold "A".

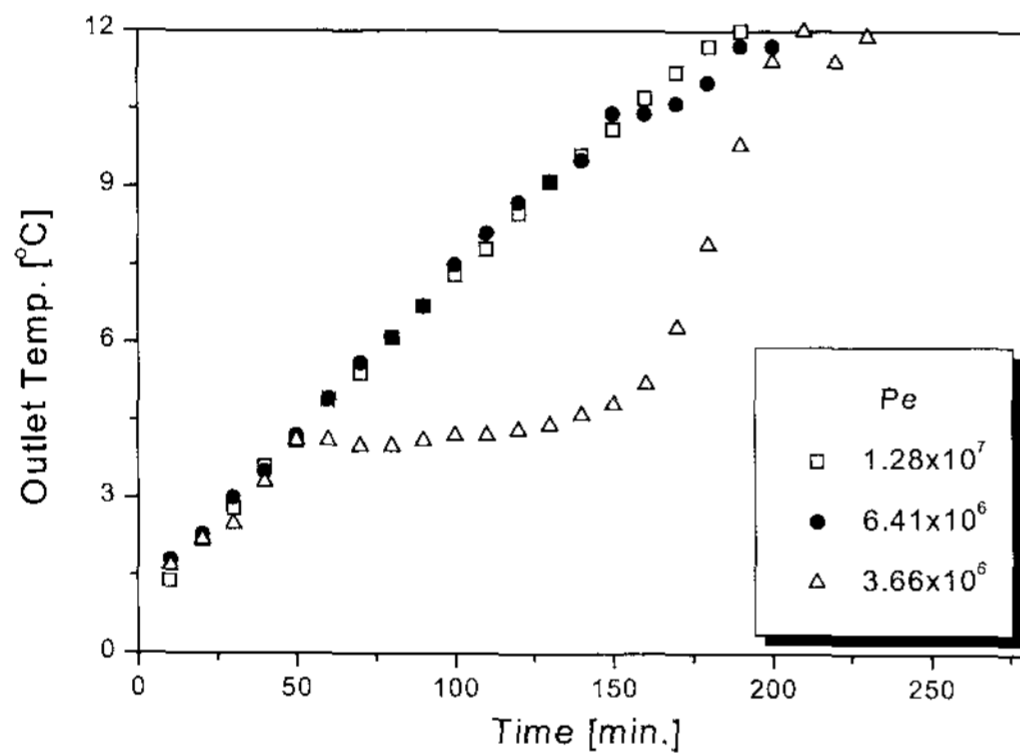


Fig. 11. Outlet temperature variations with manifold "B".

각 유출구로의 유량조절에 따라 약 30분 정도 초기 성층화 발생시간이 단축되었고 10 l/min 이상에서는 유체의 유속에 의한 혼합으로 축열조 내 유체거동을 예측하기 어려웠다. "A"형 분배관과 비교하면 저유량 조건에서는 헤더내 각 유출구로의 유량이 일정하게 유지됨에 따라 열성층 형성이 용이하였으나 Re수 10,000이상의 영역에서는 각 유출구로의 유량변화가 크지 않은 반면 강한 모멘텀에 의한 혼합으로 열성층 형성이 저해됨을 알 수 있다.

그림 9는 초기설정온도 1°C의 저온유체로 저장된 축열조 내에 부하를 거친 유체가 분배기없이

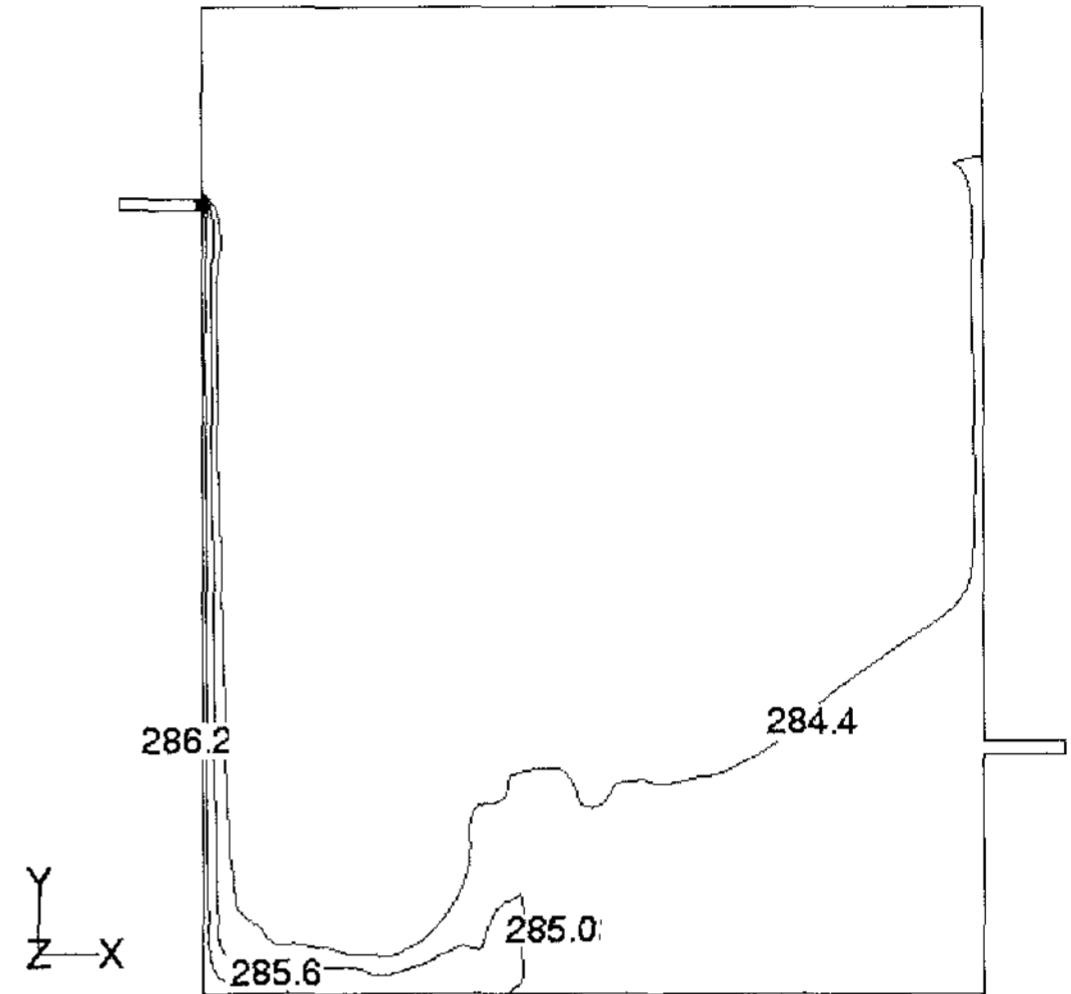


Fig. 12. Temperature distribution in the storage tank for $Pe=3.66 \times 10^6$ without a manifold. (unit : K)

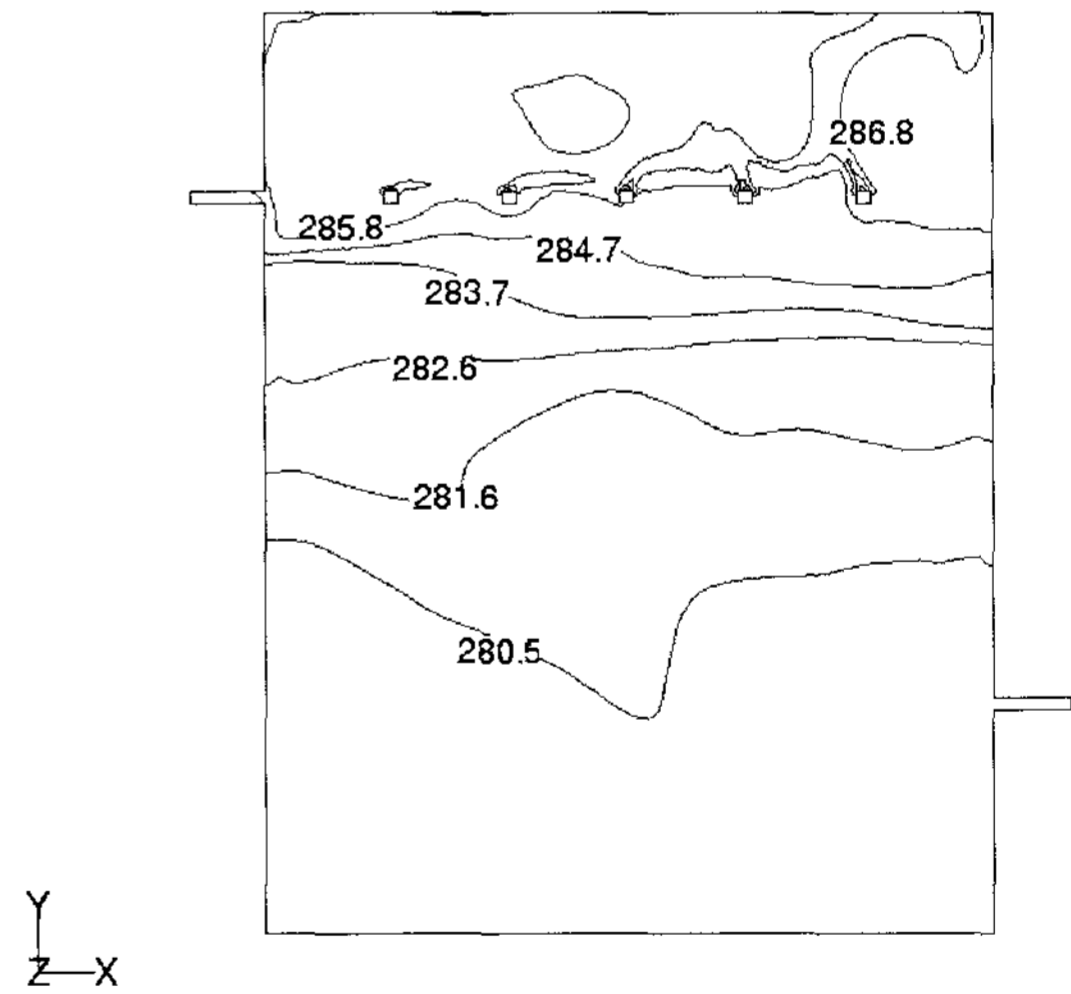


Fig. 13. Temperature distribution in the storage tank for $Pe=3.66 \times 10^6$ with manifold "A". (unit : K)

각각 유입되는 경우, 시간의 경과에 따라 출구를 통해 방출하는 유체의 온도를 측정된 값들을 나타낸다. 그림 10, 그림 11은 분배관 "A"와 분배관 "B"를 적용했을 경우 방열 과정 동안의 출구

온도 응답특성을 나타낸 것이다. 축열조 내의 유체 유동이 고속인 상태에 놓일 경우 축열조 내의 유체는 완전 혼합상태에 도달한다. 축열조에서 성층화를 이용한 효과적인 방열과정을 수행하기 위해서는 축열조 내로의 유입 유체의 유속을 제한하고 분배관의 적용이 권장된다.

3.2 해석결과와의 비교

그림 12~그림 14에 실험과 동일한 조건하에서 실시된 해석결과 얻어진 축열조 내 온도분포와 실험에 의한 온도분포를 표시하였다. 출구온도 12°C를 기준으로 실험종료 시 축열조 내 온도분포를 보여주고 있다. 유입유체의 유속이 빠른 경우는 축열조 하부에서, 유입유량이 작은 경우는 축열조 상층부에서 비교적 잘 일치하였다.

3.3 유량변화에 따른 성층화 특성

그림 15~그림 17에 각 분배관과 Pe 조건에 따른 Froude수의 실험결과를 나타내었다. 그림 15는 분배관을 적용하지 않은 경우로 $Pe=1.28 \times 10^7$, $Pe=6.41 \times 10^6$ 의 고속 유동의 범위에서는 상,

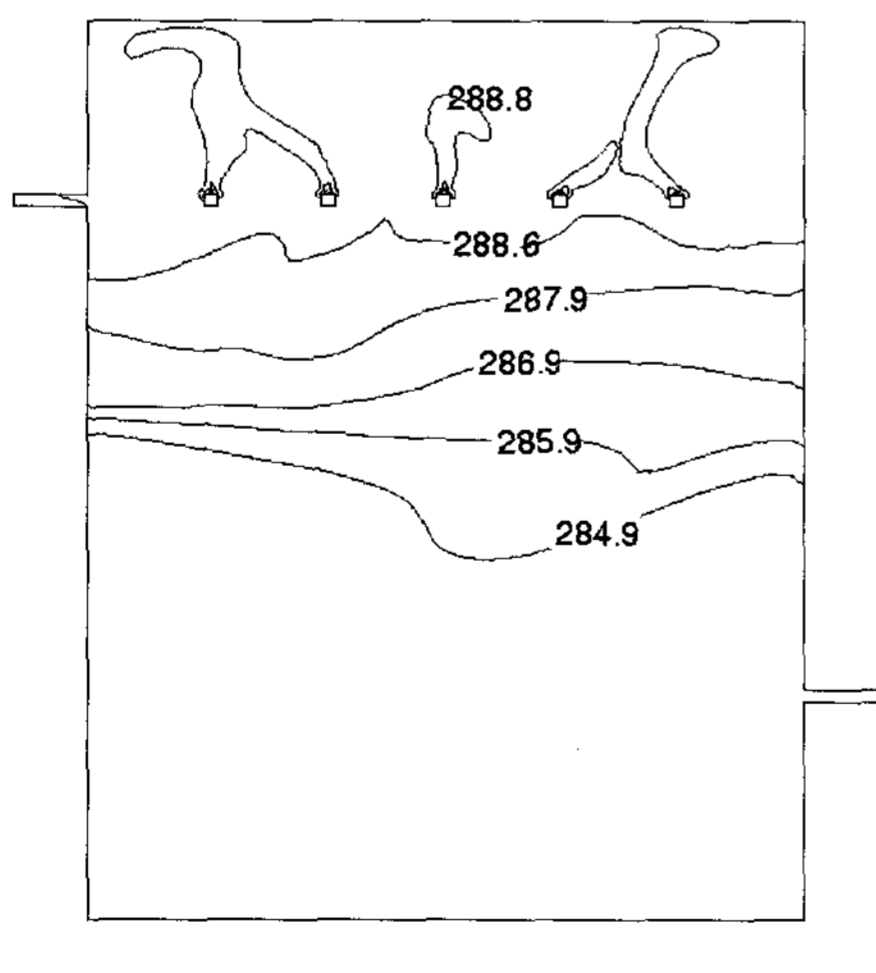


Fig. 14. Temperature distribution in the storage tank for $Pe=3.66 \times 10^6$ with manifold "B". (unit : K)

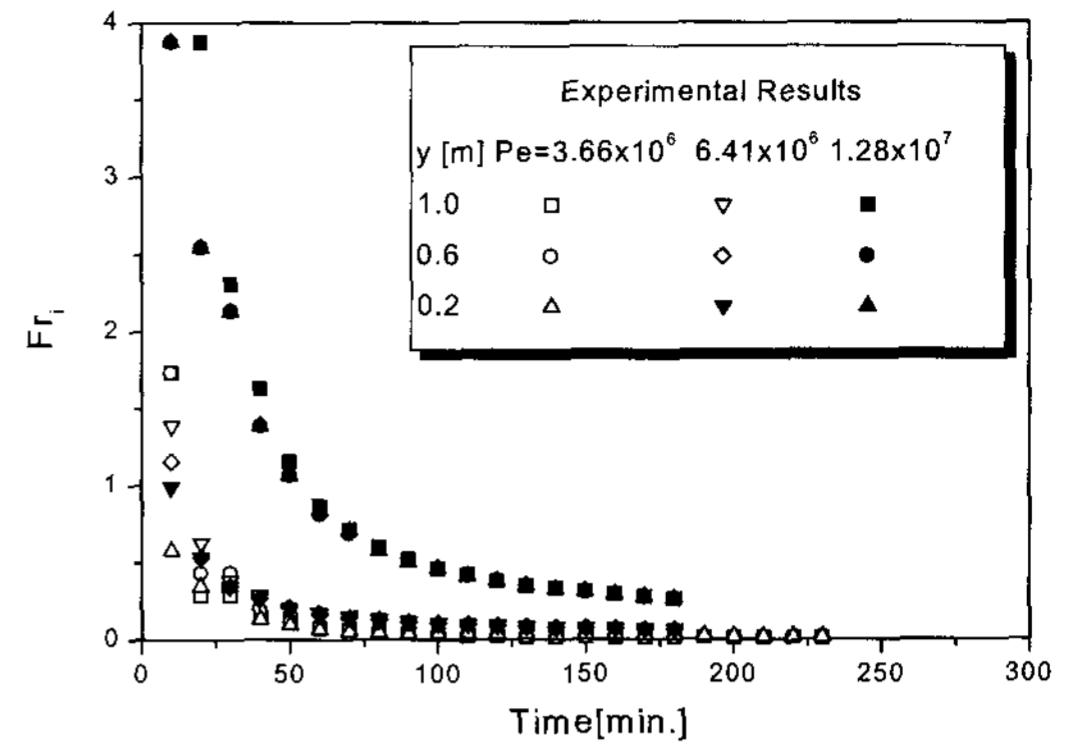


Fig. 15. Froude number obtained from the experimental works without a manifold.

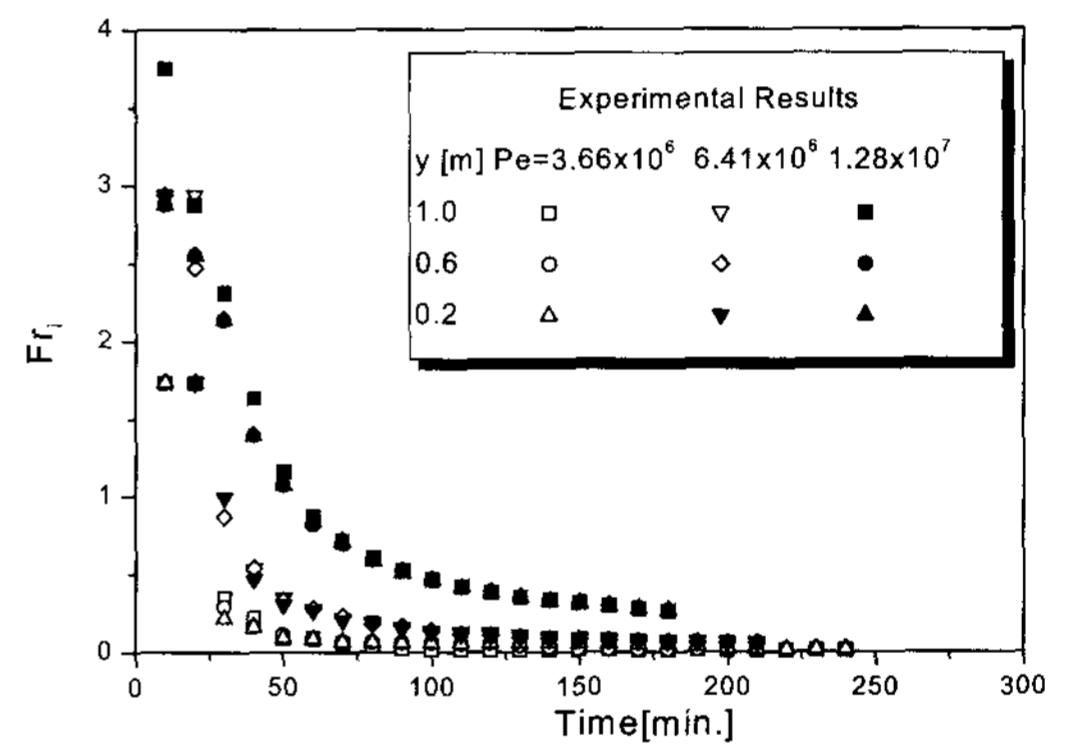


Fig. 16. Froude number obtained from the experimental works with manifold "A".

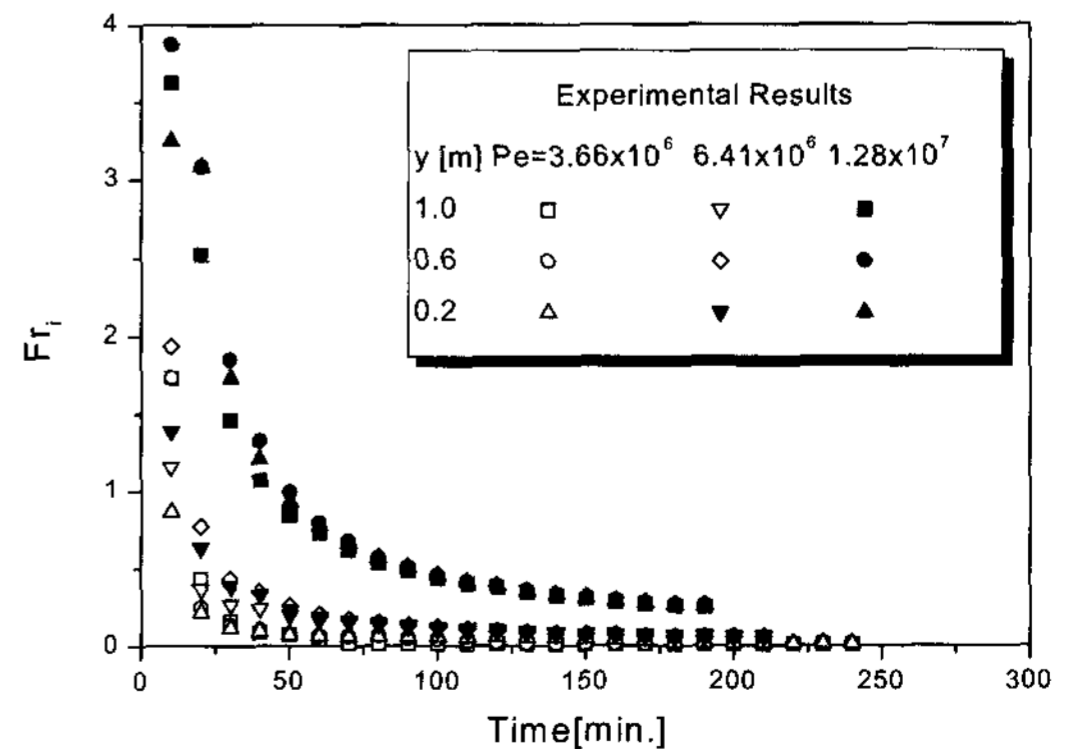


Fig. 17. Froude number obtained from the experimental works with manifold "B".

하의 온도 분포가 매우 불안정하여 $Fr_i=2\sim4$ 의 범위를 나타내고 이 시간 동안 축열조 내부의 상하 유체는 혼합되어 성층과괴가 발생하는 것으로 볼 수 있다. $Pe=3.66\times 10^6$ 의 저속 유동 범위에서는 운전 초기의 밀도역전 및 성층 안정화의 시간을 제외하고 전 구간에 걸쳐 Froude수가 1.0 이하를 유지하여 축열조의 성층화가 지속되고 있음을 알 수 있었다. 그림 16, 17은 분배관 "A"를 적용했을 때와 분배관 "B"를 적용했을 때 Froude수이다. 그림 17의 결과와 같이 고속 유동의 범위에서는 $Fr_i=2\sim4$ 의 범위를 나타내는 시간이 지속되고 이 시간 동안 축열조 내부의 상하 유체는 혼합되어 성층과괴가 발생한다.

4. 결 론

사각 단면 형상을 갖는 축열조에서 유입유체의 유량과 유입방식의 변화를 변수로 수행한 성층 실험결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 유입유량은 열성층 형성의 결정적인 인자로 작용하며 특정의 임계 Froude수를 기준으로 급격한 성층이 이루어진다. 유량의 감소에 따라 축열조 내 성층은 유체 밀도에 의한 부력에 의존하게 되며 모멘텀의 변화와 축열조의 형상의 영향은 급감된다. 특히 축열조의 형상과 유입유체의 유량, 기준온도차를 고려할 경우 Froude수 1을 기준으로 성층화 현상이 나타난다.
2. 동일한 유입유량 조건하에서 분배관의 사용으로 단순 유입방식의 경우보다 크게 성층특성이 향상됨을 알 수 있다. 분배관 내의 유량을 균일하게 유지하였을 경우 안정된 열경계층의 형성으로 에너지 추출시간을 약 12%연장할 수 있었다.
3. 축열매질을 물로 사용하는 경우 축열조내에서의 온도 역전이 발생하는 유량 범위를 알 수

있었다. 유입유량 5 l/min 이상에서는 유체의 모멘텀의 영향이 지배적이므로 온도역전 현상을 볼 수 없었으나 저유입유량의 경우 온도역전에 의한 성층화 특성변화를 고려해야 함을 알 수 있다.

4. 동일 유입구 조건하에서 열성층 형성은 유입유체의 유속에 의한 모멘텀의 크기에 크게 영향을 받는 반면 동일 유량의 조건에서는 유입구 형상에 의한 영향을 받게 된다. 유입유체에 의한 혼합을 최소화하기 위해 분배관내 정압유지가 필요함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2000년도 에너지관리공단 학술진흥사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Al-Najem. N. M., El-Reraee. M. M., A numerical study for the prediction of turbulent mixing factor in thermal storage tanks, Applied thermal engineering, Vol. 17, No. 12, pp. 1173~1181, 1997.
2. Koh. J. Y., A study on heat storage characteristics in the thermal energy storage system of ice on coil type, Ph. D Thesis, Inha University, 2001.
3. Liaw, J. S., Wang, C. C., Liao, C. C., Fang, L. J., flow distribution in dividing manifolds at low reynolds number, experimental heat transfer, Fluid mechanics and thermo dynamics, pp. 1649~1653, 1997.
4. 윤영환, 이상현, 경사분배관에 의한 다지관내의

유속분포에 대한 실험적 연구, 공기조화 냉동
공학 논문집, 제10권, 제1호, pp. 1~10, 1998.

5. 김영인, 공조용 축열시스템 개발(Ⅱ), 과학기술
처, 1989.