

【論文】

냉수가 수평유입되는 열저장탱크의 중간
경계면 부근에서의 열성층 효과

Thermal Stratification Effects Near an Interface by Horizontal Inflow of
Cold Water in Thermal Storage Tank

황성일* 박이동**
Sung-Il Hwang Ee-Tong Pak

ABSTRACT

This investigation concerns thermal stratification of the water due to the temperature difference ($\Delta T = T_{\infty} - T_i$) between the mean temperature of the water in the test tank (1 m wide, 1 m high, 2.1 m long) and the temperature of the inflow water into the tank; flow rate of circulating water and height of the sink diffuser in the test tank.

The additional objectives was to observe a stratification phenomena near an interface by measuring the velocities and the temperature difference and investigate an availabilities of the better effective hot water through establishing thermocline near an interface around the bottom of the tank.

Following results were obtained through the experiments.

1. When the flow rate was constant and the temperature difference ($\Delta T = T_{\infty} - T_i$) between the mean temperature of the flow in the test tank and the temperature of the inflow water increased by 5.6, 9.5, 13.5($^{\circ}\text{C}$), obtained the better effective advantage of hot water and the stress near an interface increased gradually.
2. When the $\Delta T = T_{\infty} - T_i$ was constant and flow rate increased by 4.0, 4.8, 6.4, 8.0 (LPM), obtained the better effective advantage of hot water and the mean stress near an interface increased gradually.
3. When the height of the sink diffuser was 25cm from tank bottom in comparison with 50cm, obtained the better effective advantage of hot water and the mean stress near an interface increased.

NOMENCLATURE

* 정회원 : 성균관대학교 기계공학과 대학원

** 정회원 : 성균관대학교 기계공학과

b : Width of test tank (m)

g : Acceleration of gravity (m/sec^2)

- h : Depth of interface (m)
- H : Depth of free surface (m)
- n : Index
- p : Pressure (kg/m²)
- t : Elapsed time after inflow starts (sec)
- T : Temperature of water in measuring point (°C)
- T_i : Temperature of inflow water (°C)
- T_∞ : Mean temperature of water in test tank (°C)
- U : X component of velocity (cm/sec)
- Û : X component of acceleration (cm/sec²)
- Ū : X component of average velocity (cm/sec)
- V : Z component of velocity (cm/sec)
- W : Y component of velocity (cm/sec)
- X : Horizontal coordinate
- Y : Lateral coordinate
- Z : Vertical coordinate
- ρ : Density of water in flow regions (g/cm³)
- ρ_f : Density of ambient water in the test tank (g/cm³)
- δ : Distance from the side wall (cm)
- τ : Shear stress (g/cm²)
- τ_w : Shear stress at the wall (g/cm²)
- ν : Kinematic viscosity of fluid (m²/sec)

1. 서 론

대양이나 저수지에서는 수심에 따라 온도 및 밀도의 변화가 존재하고, 이러한 자연현상에서 관찰되는 유체의 성층에는 온도차에 의해 형성되는 열적성층 (Thermal Stratification) 과 밀도차에 의해 형성되는 밀도성층 (Density Stratification) 이 존재하며, 또한 열적성층 과 밀도성층이 동시에 형성하는 예도있다.

유체의 성층은 태양연못 (Solar Pond)에 이용하므로써 저장된 열에너지의 이용을 높일수가

있다.

이러한 열에너지 시스템에서 어떤 물리적인 분리장치에 의존하지 않고 유체의 성층화를 형성시키는 것이 에너지 효율면에서 가장 좋은 방법이다.¹⁾ 그러므로, 탱크내에 어떠한 장애없이 온도를 가장 크게 유지시키는 방법은 탱크내로 유체가 들어가거나 나갈때마다 발생하는 중간경계면 부근에서의 혼합 (Mixing)을 최소화시키는 일이다.

Line Source 로 유입된 유체가 운동량에 의하여 탱크내에 있는 주위 유체 사이의 중간경계면에서 부분적으로 혼합이 발생하게 된다. 이러한 유입유체의 운동량에 의해 일부는 주위유체와 혼합을 하기 위해 위치에너지로 변화하며, 수조안으로 유입된 유체의 운동량은 일부가 혼합을 일으키기 때문에 중간경계면에서 유체입자들 사이에 전단력이 발생하게 되고, Entrainment 가 일어나게 되므로 중간경계면이 불안정하게 된다. 그러나, 유입되는 유체를 제한시키거나 Froude 수를 1에 가깝게 유지하므로써 유체의 운동량으로 인하여 인접한 유체층과의 혼합을 방지하여 유체를 최대이동거리로 유입시킬 수가 있다. 따라서, 중간경계면에서 Entrainment 에 의한 혼합을 방지하므로써 성층유체의 중간경계면이 수력학적으로 안정된다.

성층유체의 형성을 위하여 중간경계면의 안정성이 요구되는데, 이러한 중간경계면의 안정과 이미 형성된 성층유체를 활용할 수 있는 방법 으로서는 Line Source 로 유입되는 작동유체의 유동에 따른 중간경계면에서의 안정성에 대한 문제^{2,3)}와 Line Sink에서의 유동에 따른 중간경계면에서의 안정성 문제^{4,5)}에 대하여 광범위 하게 연구되어 왔다.

이처럼 성층유체 사이의 중간경계면 부근에서의 안정성에 영향력을 미치는 주요 지배인자들은 탱크내의 평균온도와 작동유체의 유입온도와 의 차 ($\Delta T = T_{\infty} - T_i$), 유동속, Sink Diff-

user의 높이등이 있다.⁶⁾ 이들을 단계적으로 변화시켜, 유입구가 Slot 형태인 Diffuser를 통하여 유입된 작동유체에 의하여 일어나는 유동현상을 관찰하므로써 중간경계면 부근에서의 Thermocline을 통하여 온수의 효과적 이용 여부를 판단하고자 하였다.

그리고, 부가적으로 유체역학적 견지에서 탱크내에 열적 성층이 형성되었을때 중간경계면 부근에서 평균응력을 구하여 유동특성을 관찰하였다.

2. 유동에 적용되는 관련방정식

2.1 응력윤곽 (Stress Profile)

본 연구는 두개의 혼합되기 쉬운 물사이의 중간경계면 부근에서 발생하는 유동현상을 이해하기 위하여 운동방정식을 이용하여 응력을 계산하였다.³⁾

좌표축은 작동유체의 유동방향으로 X축, 유동방향에 수직으로 Z축, 수로의 폭방향으로 Y축을 선정하였다.

Newton's Momentum Equation 으로부터,

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) \equiv \rho \dot{U} \quad \dots\dots(1)$$

측정된 속도는 수로폭에 걸친 평균속도 \bar{U} 이며, (1)식을 수로폭에 대해 평균값을 취하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\tau}_{xz}}{\partial z} = \rho \bar{\dot{U}} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{\tau}_{xy}}{\partial y} \quad \dots\dots(2)$$

이상에서,

$$\tau = \int_z \left(\rho \bar{\dot{U}} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\tau_w}{b} \right) dz \quad \dots\dots(3)$$

이 식은 평균응력을 나타내지만 중간경계면 영

역에서 유동은 거의 2차원 유동이므로 $\tau = \tau_{xz}$ 에 거의 근사하다.

여기서, 오른쪽의 각 항은 다음과 같이 계산하였다.

2.1.1 압력구배 (Pressure Gradient)

유체 정역학적인 압력을 적용하면,

$$\begin{aligned} P &= g \int_z \rho dz \\ \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial g}{\partial x} \int_z^H \rho dz + g \int_z^H \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \\ &= g \rho_f \frac{\partial H}{\partial x} + g \int_z^H \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

여기서, $\partial \rho / \partial x$ 는 Interface 근처를 제외하고는 매우적으며, 적어도 이 영역에서 일정한 밀도의 표면들이 Interface에 거의 평행하다고 가정하면 다음과 같이 정의한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = - \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)$$

(4)식에 대입하면,

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} &= \rho_f \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) - g \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) (\rho_H - \rho_z) \\ &= \rho_f \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) (\rho - \rho_f) \quad \dots\dots(5) \end{aligned}$$

여기서, 마지막 항은 Interface Slope와 Density Profile에 의하여 결정되며, 첫번째 항인 $\partial H / \partial X$ 은 무시할 정도로 작으며, 2차원 정상류라고 생각할 수 있으므로 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial p}{\partial x} \cong g \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) (\rho - \rho_f) \quad \dots\dots(6)$$

2.1.2 벽 응력 (Wall Stress)

벽 응력인 τ_w 는 벽근처에서의 속도가 다음 식과 일치한다고 가정하므로써 계산하였다.

$$\frac{U}{U_*} = f(n) \left(\frac{\delta U_*}{\nu} \right)^{1/n} \dots\dots\dots (7)$$

여기서, δ 는 벽으로 부터의 거리이고, U_* 는 $(\tau_w/\rho)^{1/2}$ 이다. 그리고, $n=7$ 일때 $f(n) = 8.74$ 임을 선정하여 계산하였다. 식 (7)을 활용하기 위하여 벽 근처의 속도와 탱크를 가로 지르는 평균속도를 연관시킬 필요가 있으며, 탱크중 심부분에서 속도분포가 포물선이라 할때 속도를 U_c 라 하면,

$$\frac{U}{U_c} = 1 - f_1 \left(\frac{y}{b} \right)^2 \quad (0 \leq y \leq y_1) \dots\dots (8)$$

$$\frac{U}{U_c} = f_2 \left\{ 1 - \left(\frac{y}{b} \right) \right\}^{1/n} \quad (y_1 \leq y \leq b) \dots\dots\dots (9)$$

$$f_2 = f \left(\frac{U_*}{U_c} \right) \left(\frac{b U_*}{\nu} \right)^{1/n} \dots\dots\dots (10)$$

여기서, U , $\partial U/\partial y$, $\partial^2 U/\partial y^2$ 는 $y = y_1$ 에서 연속적이며, n 의 함수로써 f_1 , f_2 , y_1/b 를 결정할 수 있다. 연속적이라는 조건에 의하여 f_1 , f_2 에 대하여 정리하면,

$$\frac{y_1}{b} = \frac{n}{2n-1} \dots\dots\dots (11)$$

$$f_1 = (2n-1)/n^2 \dots\dots\dots$$

$$f_2 = \left\{ (n-1)/(2n-1) \right\}^{(n-1)/n} \dots\dots (13)$$

또한, 수로단면에 대한 평균속도는

$$\frac{\bar{U}}{U_c} = \frac{2}{3} \cdot \frac{n(3n-1)}{(2n-1)(n+1)} \dots\dots (14)$$

(10), (13), (14)에서

$$\frac{U_*^2}{\bar{U}^2} \equiv \frac{\tau_w}{\rho \bar{U}^2} = \left[\frac{3}{f} \cdot \left(\frac{n-1}{2n-1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$\frac{n+1}{n} \left(\frac{2n-1}{3n-1} \right)^{\frac{2n}{n+1}} \cdot \left[\frac{b \bar{U}}{\nu} \right]^{\frac{-2}{n+1}} \dots\dots\dots (15)$$

여기서, $n=7$ 일때 탱크바닥 근처에서의 수직속도분포에 적당하므로

$$10^3 \cdot \frac{\tau_w}{\rho \bar{U}^2} = 5.11 \left(10^{-3} \cdot \frac{b \bar{U}}{\nu} \right)^{-1/4} \dots\dots\dots (16)$$

2.1.3 가속도 (Acceleration)

가속도는 직접 측정되지 않으며, 속도형상에 의해서도 결정될 수 없다. 따라서 가속도는 다음과 같은 계산에 의존하였다.

$$\rho \dot{U} = \rho \cdot \frac{\bar{U}}{t} \dots\dots\dots (17)$$

2.2 온도 무차원화

본 실험에서 수조내로 유입된 작동유체의 유동으로 인하여 발생하는 온도분포에 영향을 줄 수있는 중요한 변수로는 수조내의 평균온도와 작동유체의 유입 온도와의 차 ($\Delta T = T_\infty - T_i$), 유동율, Sink Diffuser의 위치등이 있다.

따라서, 수조내의 각 위치에 따른 온도분포를 편리하게 고찰하기 위하여 다음과 같이 무차원화 하였다.

Normalized Temperature ; θ

$$\theta = \frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_i}$$

여기서, T_∞ 는 수조내의 평균온도

T_i 는 수조내로 유입되는 작동유체의 유입 온도

T 는 각 측정점에서의 온도

3. 실험장치 및 절차

3.1 실험장치의 개요

실험장치의 구성은 실험탱크, 냉각탱크, 유량계, 펌프 (PH-D53B, PW405B), Sink Diffuser, Source Diffuser, 순환 파이프 등으로 구성되며, 계측장치로서 Hybrid Recorder (3088), X-Y Recorder (WX 4411), 작동유체가 작동되는 동안 파이프내에서 공기로 인하여 발생될 수 있는 기포를 제거하기 위한 기포 제거장치, 작동유체가 Line Source로 유입될 때 발생하는 유동의 가시적 관찰을 위한 Camera 등이 있다.

이와 같은 실험장치의 대략적인 개요도는 Fig. 1과 같다. 실험탱크는 Fig.1에서 보는바와 같이 폭 1m, 높이 1m, 길이 2.1m인 직육면체로 구성되어 있으며, 두께 12mm의 안정강화 유리로 제작하여 작동유체의 유동에 대한 가시적 관찰이 가능하도록 하였다. 수조바닥은 수압에 충분히 견디기 위하여 Stainless Steel 403을 사용하였으며, 모서리에 보강재로써 5mm 두께의 Stainless Steel 403을 사용하였다.

작동유체의 순환은 Line Source에 연결되어 있는 1/18HP, PH-D43B인 비자동 온수순환 펌프와 Line Sink에 연결된 1/2HP, PW

-405B인 비자동 고층 건물용 펌프를 이용하였다.

유량계는 측정범위가 0.8 ~ 8.0 (LPM) 인 Floating Type (부자식) 유량계를 Line Source와 Line Sink에 각각 설치하여 작동유체의 유입량과 유출량을 일정하게 유지하도록 하였다.

Diffuser의 Slot는 Line Source, Line Sink의 경우에 각각 2mm로 제작하였으며, 유입부는 수조저면에 고정하고, 유출부는 수직이동이 가능하도록 하였다.

본 실험에서 사용된 냉각탱크의 부피는 200ℓ이며, 냉매로써 얼음을 사용하였다. 탱크내의 열손실을 최대한으로 줄이기 위하여 단열재인 유리섬유로 탱크바깥부분을 덮어 씌웠으며, 그 위에 두께가 10mm인 토이론과 비닐테이프를 사용하여 이중으로 덮어 씌웠다. 냉각탱크의 덮개로는 단열효과가 좋으면서 Thermocouple 설치가 용이한 30mm 두께의 스티로폼을 사용하였으며, 그 위에 15mm 두께의 널판지인 보조 덮개를 사용하였다. 실제로 실험과정중 냉각탱크의 열손실은 거의 없었다.

그 이외의 계측장치로서 온도측정은 측정범위가 -200 ~ 400℃인 28개의 T형과 -200

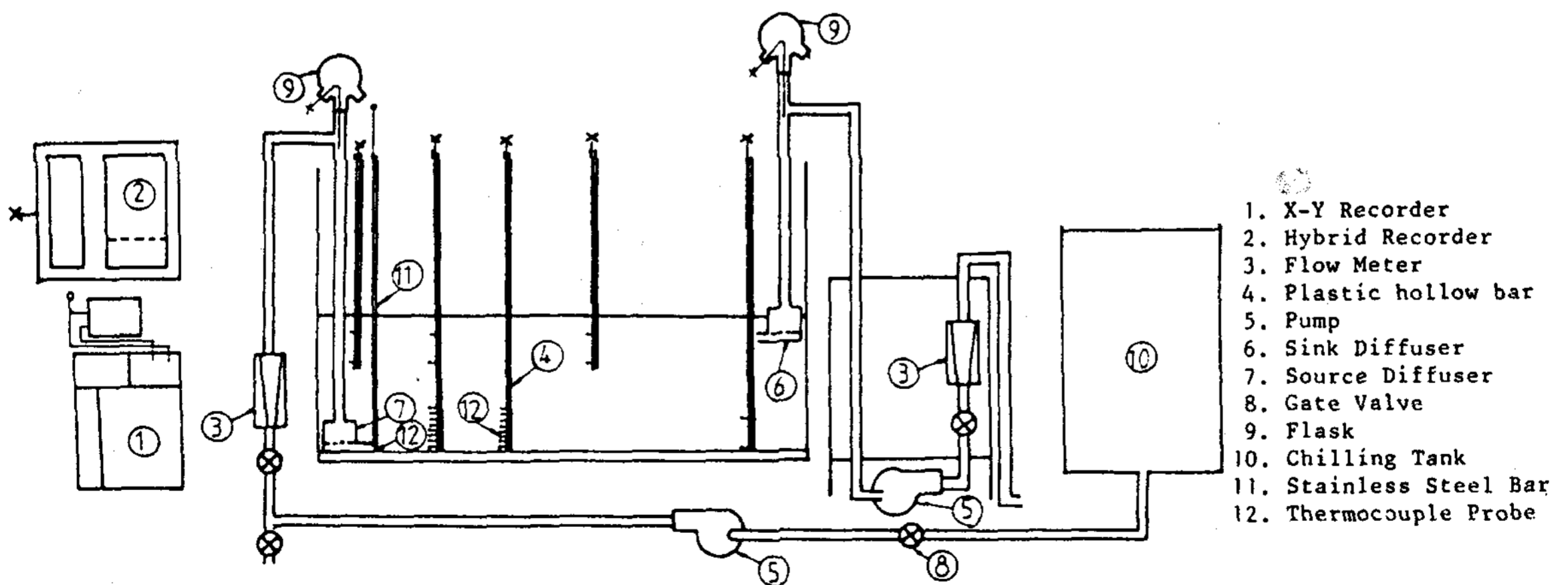


Fig. 1 Skeleton of experimental apparatus

°C~1200°C인 2개의 K형 Thermocouple 을 Fig.1 에서와 같이 설치하여 이를 Hybrid Recorder (Model 3088, Yokogawa Hoku-shin Electronic corporation) 에 연결하여 정확한 온도를 측정하였다.

그리고, 탱크내로 유입되는 작동유체의 유동에 대한 가시적 관찰을 위하여 냉각탱크내의 청수와 밀도가 거의 비슷한 용해된 염료를 선택하기 위하여 Pycnometer 를 사용하여 용해된 염료의 밀도를 측정하였다. Pycnometer 는 정확도가 $10^{-3} g/cm$ 이며, 보다 높은 정확도를 얻을 수 있도록 유리의 습기와 Sampling 의 증발을 제한시켰다. Sample 은 25 ml 인 뷰렛을 이용하여 Pycnometer 에 담아 Electronic Balance (Chyo Balance Co., 1/1000 Scale) 를 이용하여 질량을 측정하였다.

3.2 실험절차

(1) 탱크내에 유동의 가시적 관찰을 위하여 일정량의 염료를 넣고 탱크내의 전 작동유체가 균일한 온도를 유지하도록 실험가동직전에 혼합을 시킨후 펌프를 가동시켜 Line Source 로 유입되는 양만큼 Line Sink 를 통하여 유출되도록 유량계를 이용하여 각각의 유동율을 같게 유지하도록 한다.

(2) 본 실험에서 사용된 유동율은 4.0, 4.8, 6.4, 8.0 (LPM)인 4단계로 변화시키며, 각 유동율에 따라 탱크내의 평균온도와 작동유체의 유입온도와의 차인 $\Delta T = (T_{\infty} - T_i)$ 를 5.6, 9.5, 13.5 (°C) 로 단계적으로 변화시키므로써 탱크내에서 일어나는 유동형태에 따른 온도를 측정하여 온도유평을 조사하였다.

(3) 탱크상단에 조명장치로 설치된 500 W, 110 V 인 두개의 전구를 이용하여 $\Delta T = T_{\infty} - T_i$, 유동율을 각각 변화시키므로써 실험탱크내로 유입되는 작동유체의 유동방향에 따라 가시적 관찰이 가능하도록 혼합된 염료의 농도를 이용하여 사진을 찍었으며, 이때 두개의 초시계

를 이용하여 탱크벽면에 고정된 1.0(cm) × 1.0 (cm) 격자무늬의 Grid Sheet 를 통하여 평균 속도를 구하였다.

4. 열 성층과 응력유평 및 고찰

4.1 유동률이 일정하고, 수조내의 평균온도와 작동유체의 유입온도와의 차 ($\Delta T = T_{\infty} - T_i$) 를 단계적으로 증가시키는 경우 :

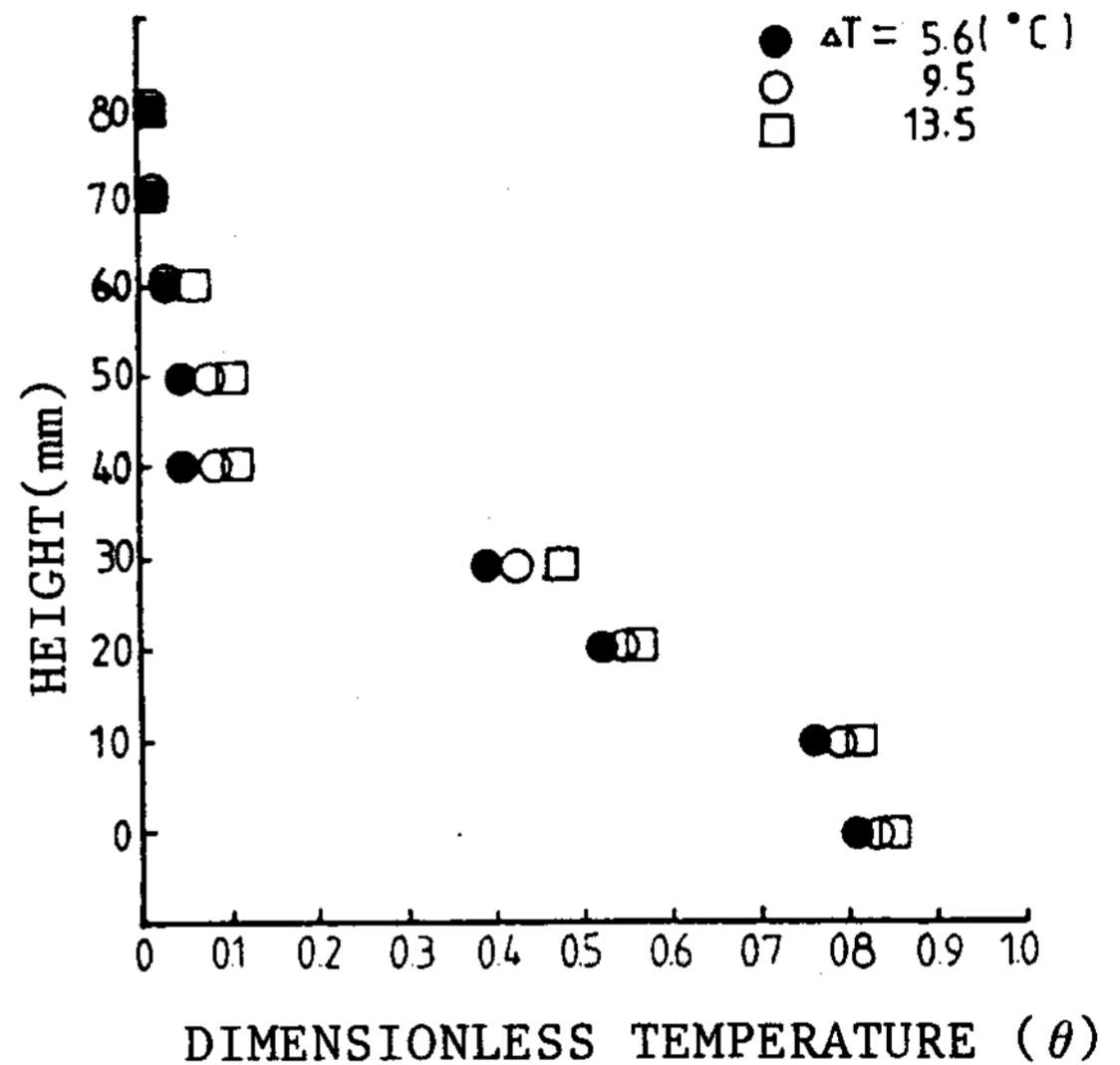


Fig. 2 Variations of the dimensionless temperature with ΔT after the time passed on the 7min at where the length of the flow direction from the line source is 40cm. (Q=8.0 LPM)

4.1.1 온도유평

(1) Q=8.0 (LPM)일때 ;

이에 대한 온도유평은 Fig.2 에서 대표적으로 보여주고 있으며, 시간이 7min 경과된 후 온도성층 두께는 측정위치가 Line Source 로부터 40 cm인 경우 60 ~ 70 mm 사이에서 형성되었으며, 60 cm인 경우는 50 ~ 60 mm 사이에서 형성되었다.

(2) Q = 6.4 (LPM)일때 ;

이에 대한 온도윤곽은 Fig.3 에서 대표적으로 보여주고 있으며, 시간이 7 min 경과된 후 온도성층 두께는 측정위치가 Line Source 로 부터 40 cm인 경우 50 ~ 60 mm 사이에서 형성되었으며, 60 cm인 경우에도 50 ~ 60 mm 사이에서 형성되었다.

4.1.2 응력윤곽

(1) Q = 6.4 (LPM) 일때 ;

이에 대한 응력윤곽은 Fig.4에서 대표적으로 보여주고 있다.

1. ΔT 가 5.6°C이며, 측정위치가 Line Source 로 부터 유동방향으로 40 cm인 곳에서 시간이 7 min, 18 min 경과된 후 평균응력은 0.024 kg/m², 0.029 kg/m² 이다.

그리고, 측정위치가 60 cm인 곳에서 시간이 7 min, 18 min 경과된 후 평균응력은 0.022 kg/m², 0.026 kg/m² 이다.

2. ΔT 가 9.5°C이며, 측정위치가 Line Source 로부터 유동방향으로 40 cm인 곳에서 시간이 7min, 18 min 경과된 후 평균응력은 0.037kg/m², 0.045kg/m²이다. 그리고, 측정위치가 60 cm인 곳에서 시간이 7 min, 18 min 경과된 후 평균응력은 0.032 kg/m², 0.043 kg/m² 이다.

3. ΔT 가 13.5°C이며, 측정위치가 Line Source 로 부터 유동방향으로 40 cm인 곳에서 시간이 7min, 18 min 경과된 후 평균응력은 0.062 kg/m², 0.079 kg/m² 이다. 그리고, 측정위치가 60 cm인 곳에서 시간이 7min, 18min 경과된 후 평균응력은 0.048 kg/m², 0.069 kg/m² 이다.

이상에서 각 유동률에 따라 온도성층의 두께가 약간씩 증가하였으며, 이 성층두께 내에서 ΔT 가 증가할수록 무차원 온도값은 증가하고, 중간경계면 부근에서의 평균응력은 증가하였다.

이는 ΔT 가 증가할수록 중간경계면 부근에서의 전단응력이 커지므로써 작동유체의 유동으로

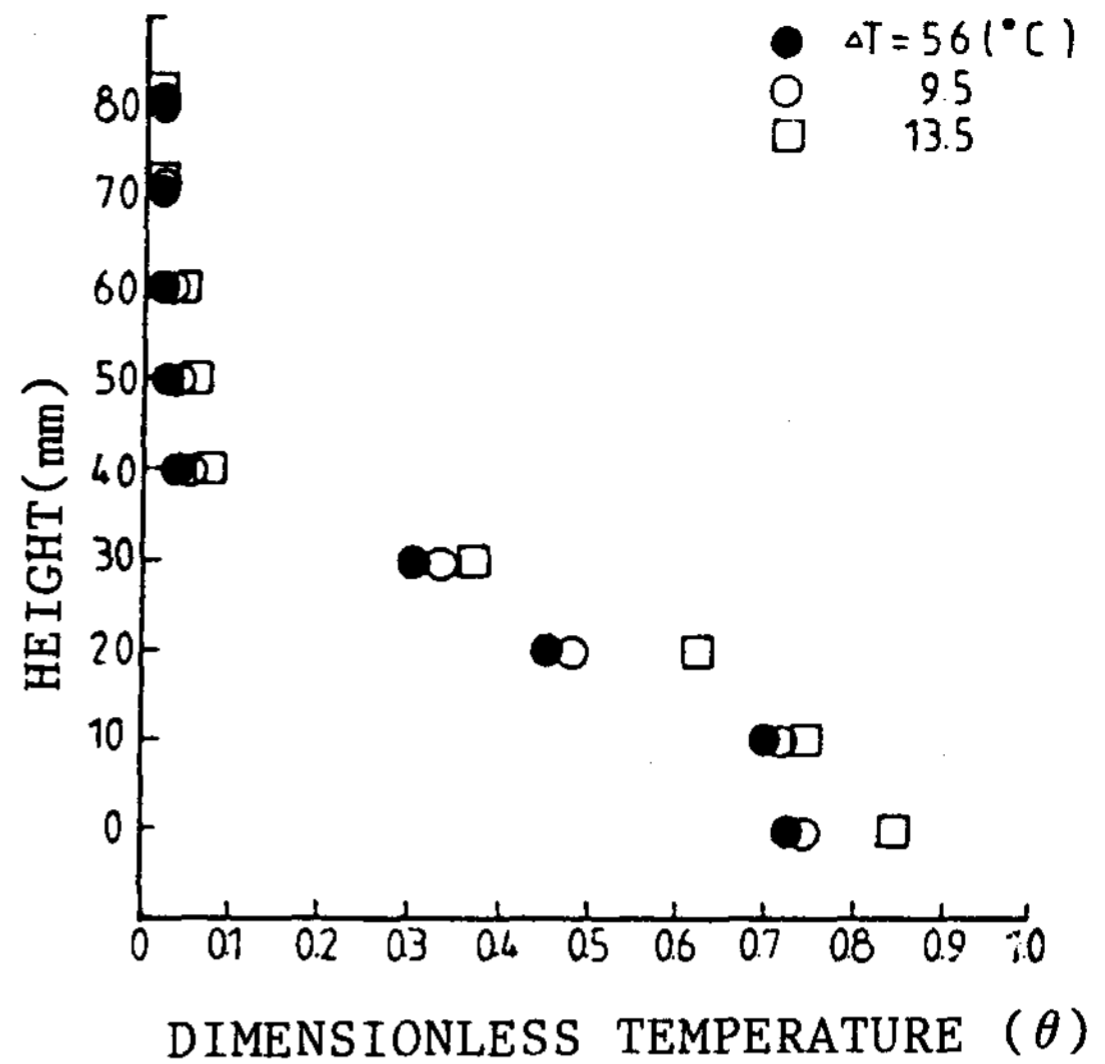


Fig. 3 Variations of the dimensionless temperature with ΔT after the time passed on the 7min at where the length of the flow direction from the line source is 40 cm (Q=6.4LPM)

인하여 형성되는 Entrainment 가 감소하게 되고, 혼합이 감소하기 때문이다.

측정위치가 Line Source 로 부터 유동방향으로 40 cm인 곳에서 무차원 온도값이 60 cm 인 곳에서보다 크게 나타나는데 이는 40 cm인 곳에서 중간경계면 부근에서의 전단응력이 60 cm인 곳에서 보다 크기때문에 점성의 영향으로 인하여 혼합이 감소하기 때문이다. 그러므로 60 cm인 곳에서 활발한 온도확산이 발생하고 있음을 알 수가 있다.

4.2 수조내의 평균온도와 작동유체의 유입온도와의 차 ($\Delta T = T_{\infty} - T_i$)가 일정하고, 유동율을 단계적으로 증가시키는 경우 :

4.2.1 온도윤곽

(1) $\Delta T = 5.6$ °C일때 ;

이에 대한 온도윤곽은 Fig.5 에서 대표적으로 보여주고 있으며, 시간이 7 min 경과된 후

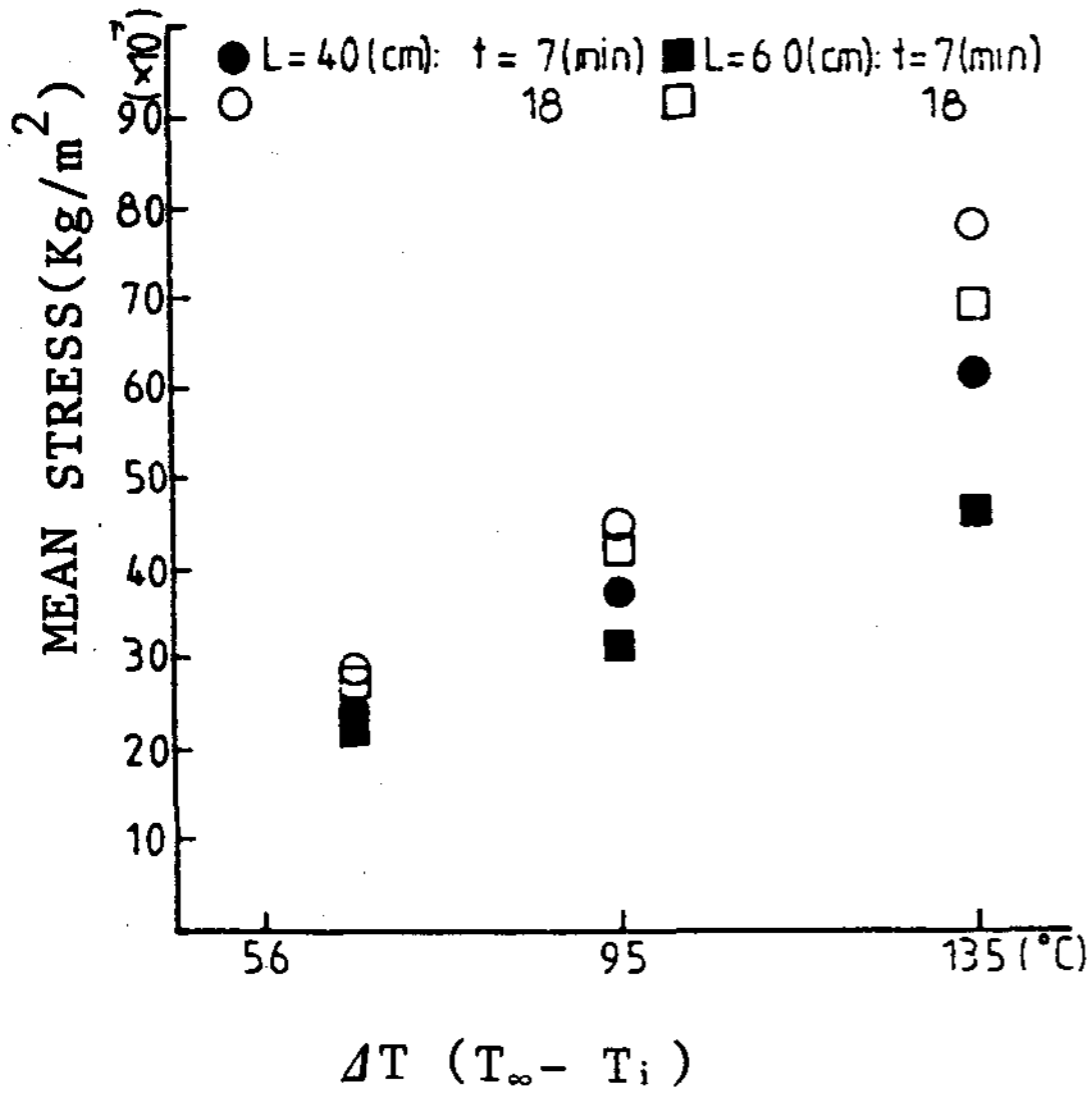


Fig. 4 Variations of the mean stress near an interface with change of the $\Delta T(T_{\infty} - T_i)$ at where the length of the flow direction from the line source is 40cm, 60cm ($Q=6.4\text{LPM}$)

온도성층 두께는 측정위치가 Line Source 로 부터 유동방향으로 40 cm, 60 cm인 경우 모두 50 mm ~ 60 mm 사이에서 형성되었다.

(2) $\Delta T = 9.5^\circ\text{C}$ 일때 ;

이에 대한 온도윤곽은 Fig.6 에서 대표적으로 보여주고 있으며, 시간이 7min 경과된 후 온도성층 두께는 측정위치가 Line Source 로 부터 유동방향으로 40 cm, 60 cm인 경우 모두 50 cm ~ 60 cm 사이에서 형성되었다.

4.2.2 응력윤곽

(1) $\Delta T = 9.5^\circ\text{C}$ 일때 ;

이에 대한 응력윤곽은 Fig.7에서 대표적으로 보여주고 있다.

1. 측정위치가 Line Source 로 부터 유동방향으로 40 cm인 곳에서 유동률이 4.0, 4.8, 6.4, 8.0 (LPM) 일때 평균응력은 0.013 kg/m², 0.017 kg/m², 0.044 kg/m², 0.057 kg/m²

이다.

2. 측정위치가 60 cm인 곳에서 유동률이 4.0, 4.8, 6.4, 8.0(LPM)일때 평균응력은 0.01 kg/m², 0.014 kg/m², 0.043 kg/m², 0.053 kg/m²이다.

이상에서 각각의 ΔT 에 따라서 온도성층의 두께는 약간씩 증가하였으며, 이 성층두께내에서 유동률이 증가할수록 무차원 온도값이 증가하고, 중간경계면 부근에서의 평균응력은 증가하였다.

이는 유동률이 증가할수록 유동방향에 수직으로 속도구배가 증가하므로 중간경계면 부근에서 전단응력은 커지고, 작동유체의 유동으로 인하여 형성되는 혼합을 감소시키므로써 주위유체로의 열확산을 방지하기때문이다.

4.3 Sink Diffuser 의 위치가 탱크저면으로부터 25 cm, 50 cm인 경우 :

4.3.1 온도윤곽

(1) Sink Diffuser 의 위치가 25 cm인 경우 ;

이에 대한 온도윤곽은 Fig.8 에서 대표적으로 보여주고 있으며, 시간이 18 min 경과된 후 온도성층 두께는 측정위치가 Line Source 로 부터 유동방향으로 40 cm인 경우 80 mm ~ 90 mm 사이에서 형성되었다. 이에 대한 응력윤곽은 Fig.4 에서 보여주고 있다.

(2) Sink Diffuser 의 위치가 50 cm인 경우 ;

이에 대한 온도윤곽은 시간이 18 min 경과된 후 온도성층 두께는 측정위치가 Line Source 로 부터 유동방향으로 40 cm인 경우 70 mm ~ 80 mm 사이에서 형성되었다.

이에 대한 응력윤곽은 Fig.9 에서 대표적으로 보여주고 있다.

이상에서 Sink Diffuser 의 위치가 25 cm, 50 cm인 경우를 비교하면 거의 유사한 경향을

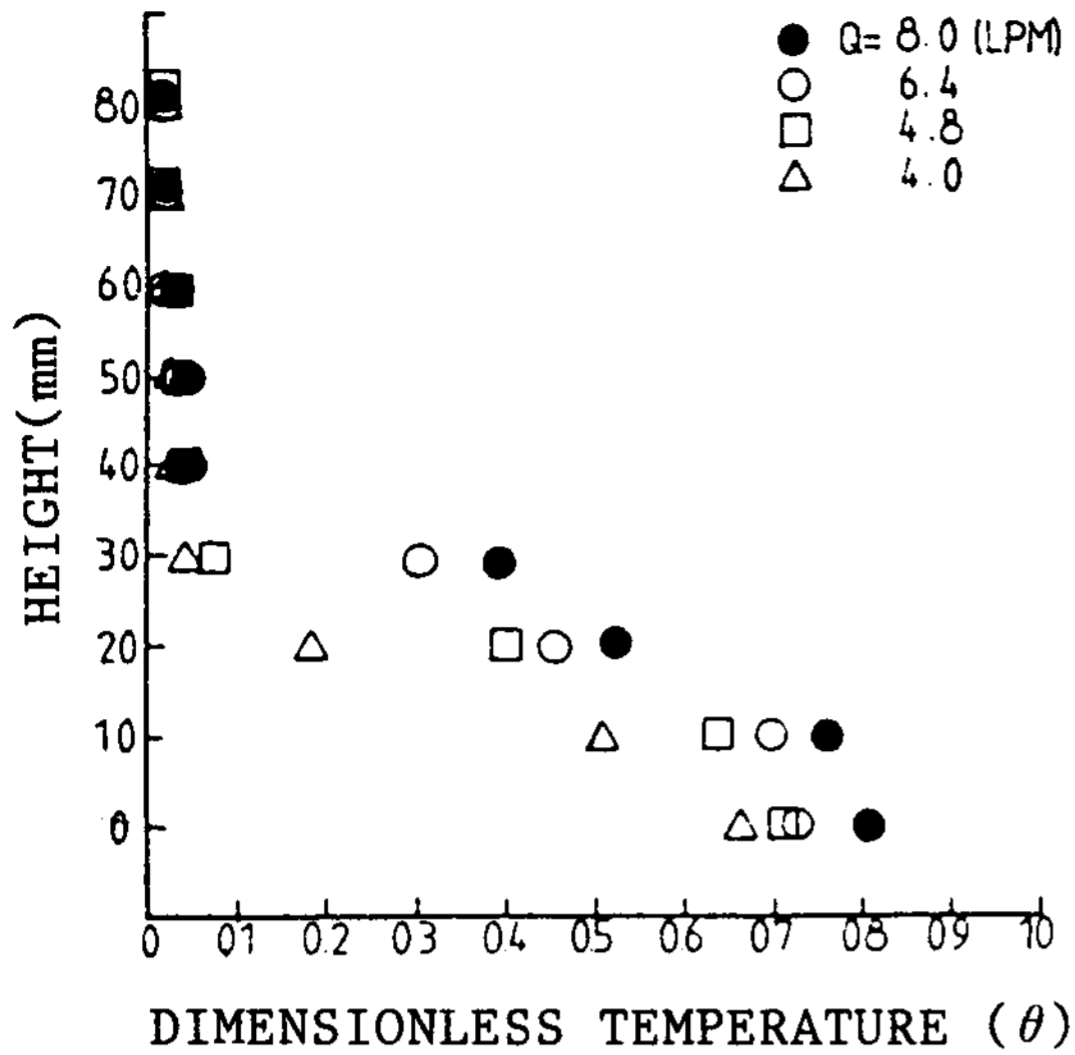


Fig. 5 Variations of the dimensionless temperature with flow rate after the time passed on the 7min at where the length of the flow direction from the line source is 40cm ($\Delta T=5.6^\circ C$)

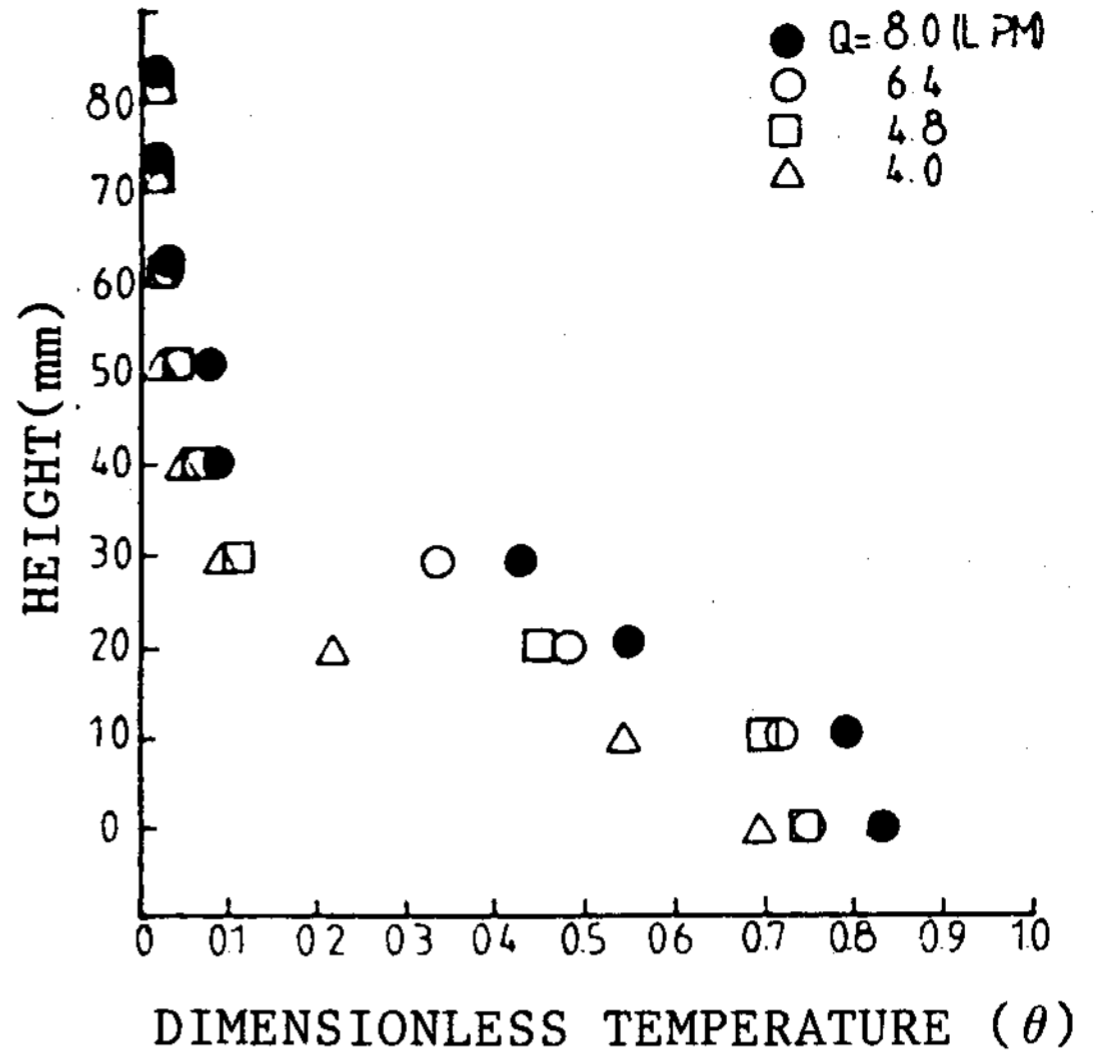


Fig. 6 Variations of the dimensionless temperature with flow rate after the time passed on the 7min at where the length of the flow direction from the line source is 40cm ($\Delta T=9.5^\circ C$)

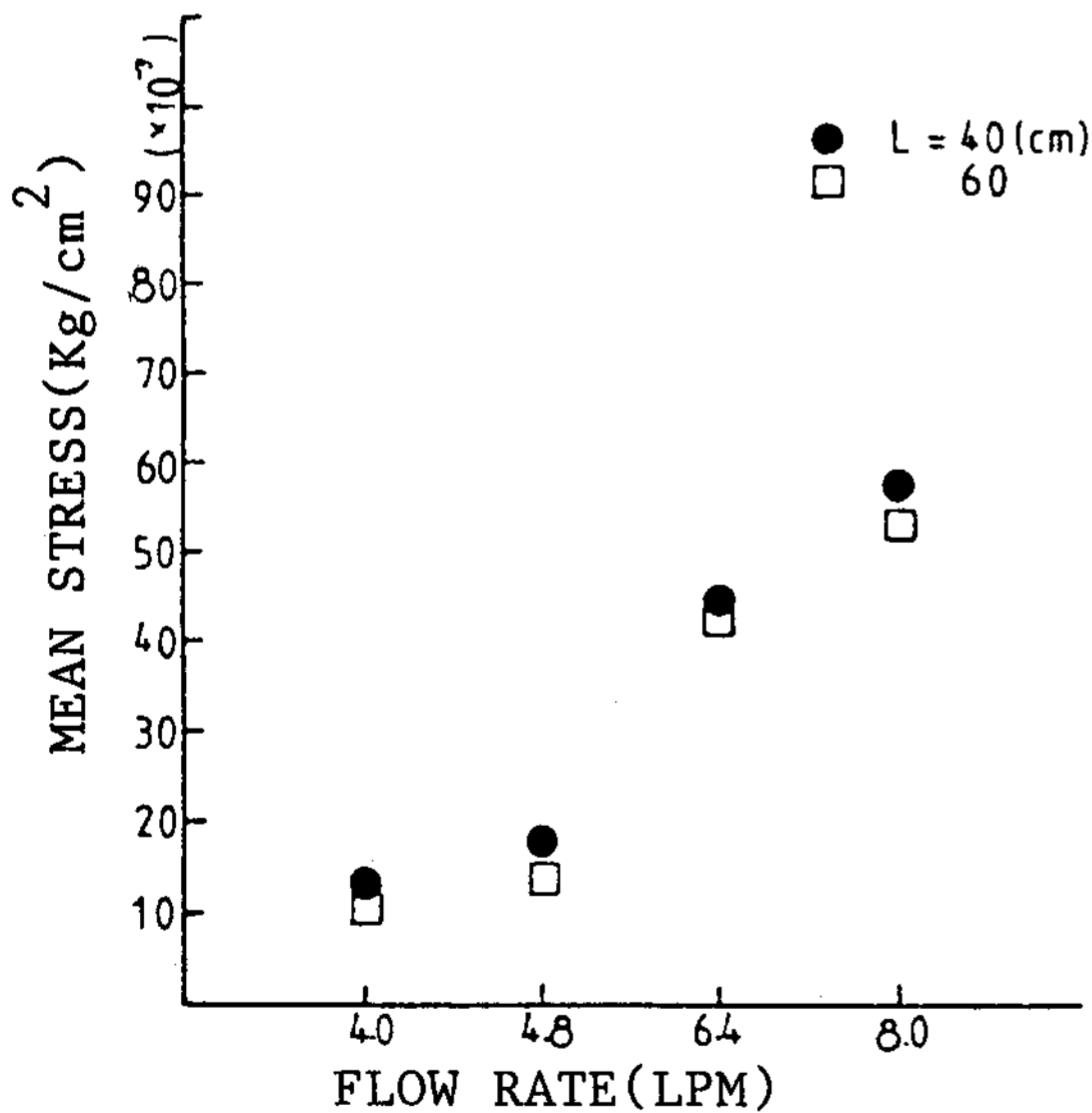


Fig. 7 Variations of the mean stress near an interface with change of the flow rate at where the length of the flow direction from the line source is 40cm, 60cm ($\Delta T=9.5^\circ C$; $t=18$ min)

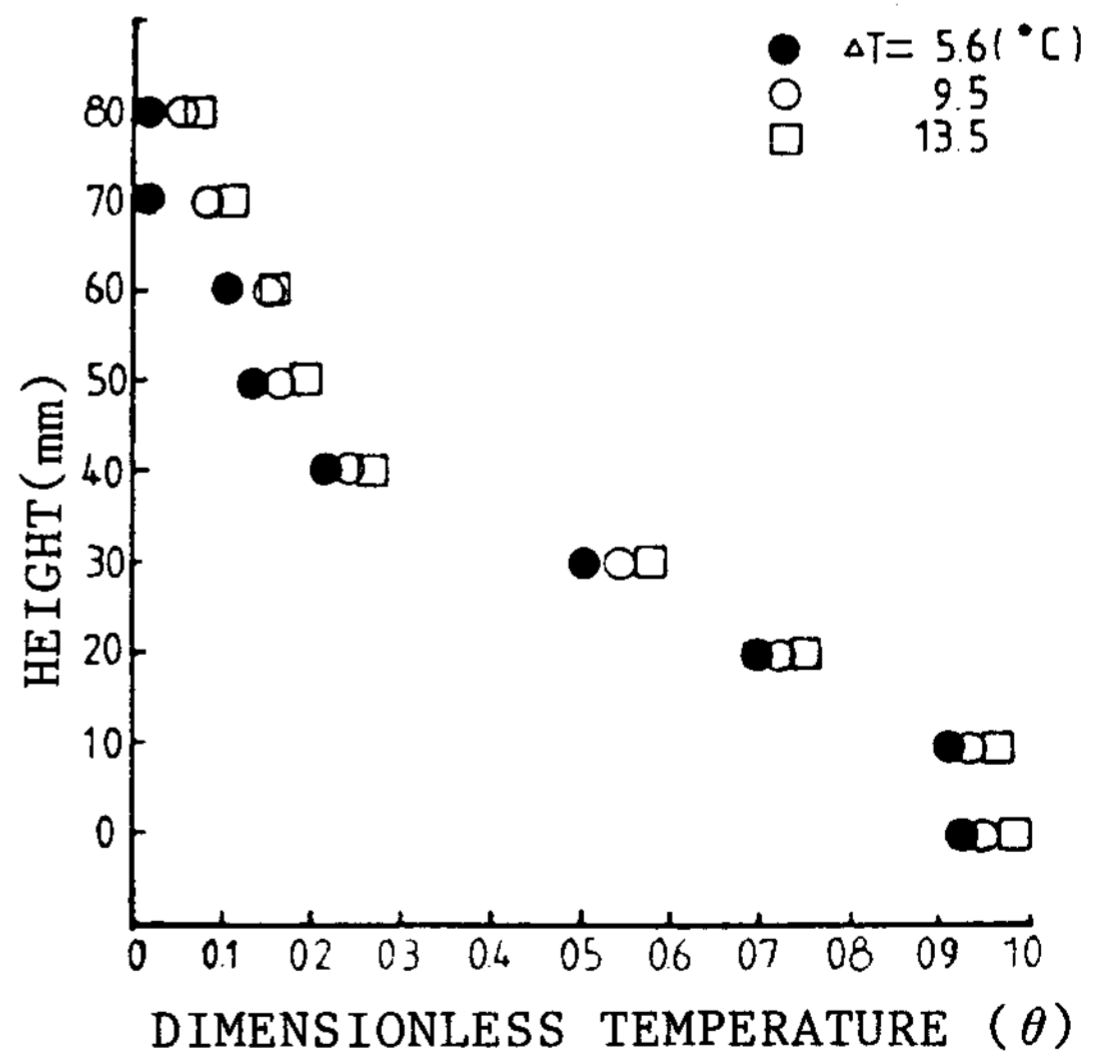


Fig. 8 Variations of the dimensionless temperature with ΔT after the time passed on the 18min at where the length of the flow direction from the line source is 40cm ($Q=8.0$ LPM)

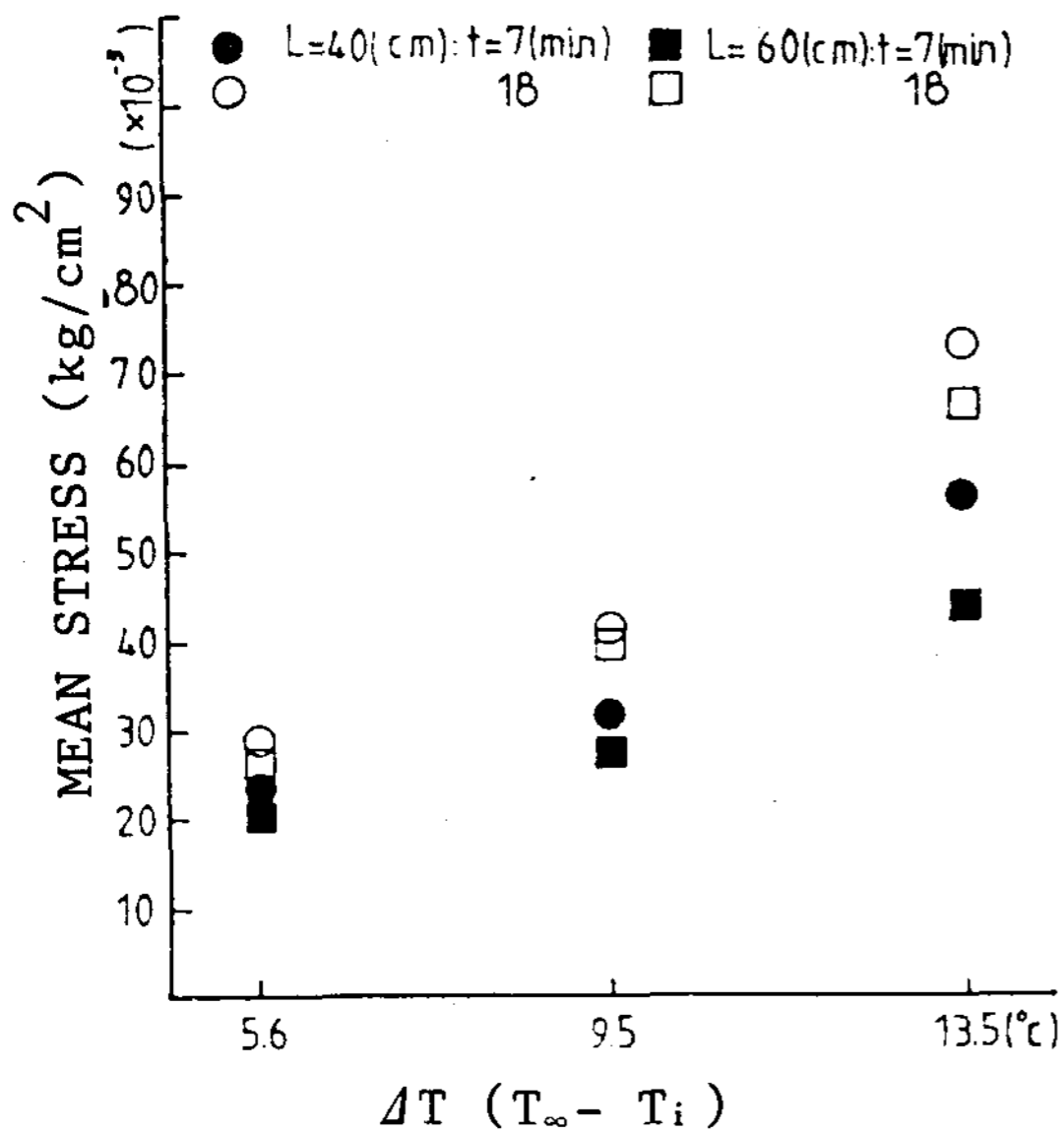


Fig. 9 Variations of the mean stress near an interface with change of the $\Delta T(T_{\infty} - T_i)$ at where the length of the flow direction from the line source is 40cm, 60cm ($Q=6.4\text{LPM}$)

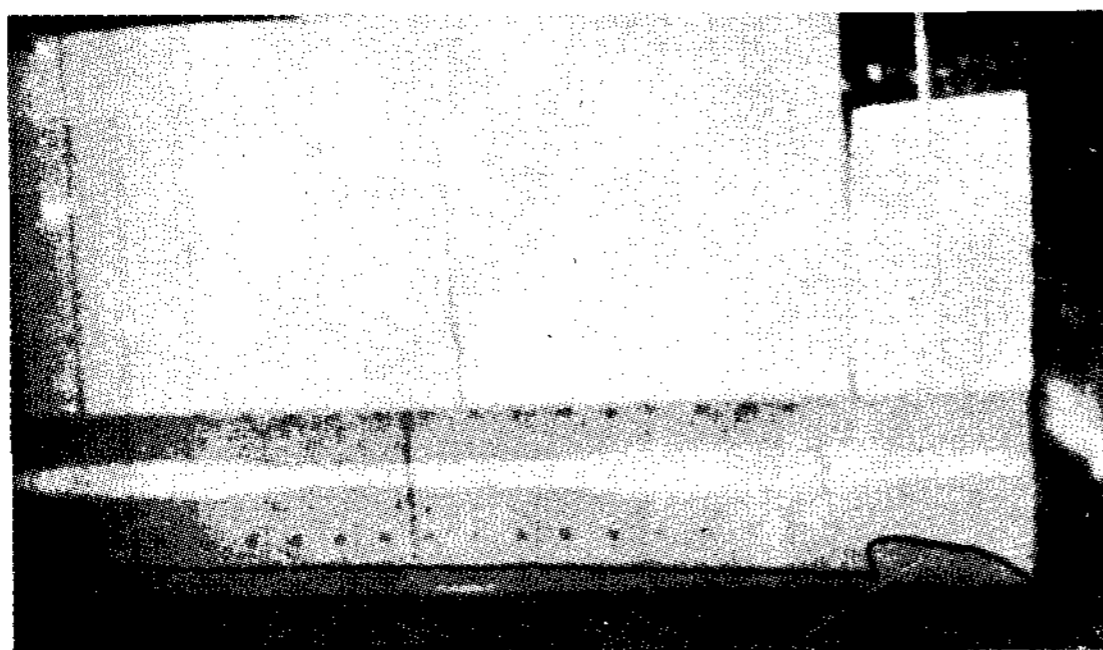


Fig. 10 A side view photograph of a 2-dimensional current

나타내며, 온도성층의 두께 및 무차원 온도값은 Sink Diffuser의 위치가 25cm인 경우가 50cm일때 보다 크다. 그리고, 중간경계면 부근에서의 평균응력값도 25cm인 경우가 더 크다.

이는 열 확산이 빨리 진행되기 때문에 혼합이 크게 발생하기 때문이다.

4.4 온도성층의 특성

본 실험에서는 작동유체의 강제유입에 따라 수조내에서 발생하는 중력흐름의 유동형상을 관찰하였다.

일반적으로 작동유체의 추진력을 일으키는 밀도차는 주로 온도차에 기인하며, Fig.10에서 처럼 전반적인 중력흐름은 흐름의 앞부분에서 뚜렷한 Current Head를 보여주고 있다.

그리고, Current Thickness는 흐름의 앞부분으로 갈수록 균일하거나 약간씩 경사지면서 얇아짐을 보여주고 있다.

5. 결 론

1) 유동률을 일정하게 하고, 탱크내의 평균온도와 작동유체의 유입온도와의 차를 5.6, 9.5, 13.5 (°C)로 증가시킬때, 온도성층 두께는 약간씩 증가하며, 또한 무차원 온도값이나 중간경계면 부근에서의 평균응력은 증가한다.

따라서, 탱크내의 평균온도와 작동유체의 유입온도와의 차가 증가할수록 작동유체에 대해 보다 효과적인 온수를 이용할 수가 있다.

2) 탱크내의 평균온도와 작동유체의 유입온도와의 차를 일정하게 하고, 유동률을 4.0, 4.8, 6.4, 8.0 (LPM)으로 증가시킬때 온도성층 두께는 약간씩 증가하며, 또한 무차원 온도값이나 중간경계면 부근에서의 평균응력은 증가한다.

따라서, 유동률을 증가시킬 수록 작동유체에 대해 보다 효과적인 온수를 이용할 수가 있다.

3) Sink Diffuser의 위치가 수조저면으로 부터 25cm일때가 50cm일 때보다 온도성층 두께와 무차원 온도값이 크다. 또한 중간경계면 부근에서의 평균응력이 크다.

따라서, Sink Diffuser의 위치가 수조저면으로 부터 25cm일때, 보다 효과적인 온수를 얻을 수가 있다.

REFERENCES

1. W.D. Baines, W.W. Martin and D.M. Smith,

- “Developed of Stratification in Rectangular Tank by Horizontal Inflow.”, Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 105, pp. 59-64, 1983.
2. G.H. Keulegan, “Interfacial Instability and Mixing in Stratified Flows.”, J. Res, Nat. Bur. Stand. Vol. 43, pp. 487-500, 1949.
 3. Karl Loquist, “Flow and Stress Near an Interface Between stratified liquids.”, National Bureau of Standards, Washington 25, D.C. Vol. 3, No. 2, 1960.
 4. D.L. Wilkinson and I.R. Wood, “A Rapidly Varied flow Phenomenon in a Two-Layer Flow.”, J. Fluid Mech. 47, Part 2, pp. 241-256, 1977.
 5. A.T. Ippen and D.R.F. Harlemann, “Steady-State Characteristics of Subsurface Flow.”, National Bureau of Standards Circular 521, pp. 79-93, 1952.
 6. I.R. Wood, “Horizontal Two-Dimensional Density Current.”, Journal of the Hydraulic Division, pp. 35-42, 1967.