

<論 文>

실험적 방법에 의한 두 평판 사이의 난류 열대류의 해석

윤 효 철\* · 정 명 균\*\*

(1988년 3월 8일 접수)

Experimental Study of Turbulent Thermal Convection  
Between Two Flat Plates

Hyo Chul Yun and Myung Kyoon Chung

**Key Words :** Turbulent Thermal Convection(난류열대류), Kinematic Heat Flux(동적열전달량), Temperature Defect Scale(온도결함척도), Velocity Scale(속도척도), Length Scale(거리척도), Mean Temperature Profile(평균온도분포), Temperature Gradient Profile(온도구배분포)

Abstract

Experiments have been conducted to investigate mean thermal structure in unstable turbulent thermal convection between two horizontal flat plates. The upper plate was kept at a constant cold temperature and the bottom plate at a constant hot temperature. Both air and water were used as its working fluids. Chamber aspect ratios were 3.80 and 6.17, the mean temperature differences between two plates were 2.6~9.3°C, whose Rayleigh numbers in a range  $6.13 \times 10^5 \sim 1.07 \times 10^8$ . The heat transfer correlations obtained through the experiments are  $Nu = 0.139 Ra^{0.285}$  for air and  $Nu = 0.087 Ra^{0.319}$  for water. Profiles of the mean temperature gradient clearly show the -2 and -4/3 power law regions.

기 호 설 명

$D$ : 두 평판 사이의 거리(m)	$Q$ : 동적 열전달량(m/sec °C)
$H$ : 실제 열전달량(kW/m <sup>2</sup> )	$Ra$ : Rayleigh수
$H_0$ : 전도 열전달량(kW/m <sup>2</sup> )	$t$ : 시간(sec)
$k_w$ : 벽에서의 열전도 계수(kW/m °C)	$T^*$ : 무차원 온도
$k_f$ : 유동층 중간에서의 열전도 계수(kW/m °C)	$T$ : 측정 위치에서의 온도(°C)
$Nu$ : Nusselt수	$T_H$ : 더운 아래 평판의 온도(°C)
$Pr$ : Prandtl수	$\Delta T$ : 두 평판 사이의 온도차(°C)
$Pr_0$ : 임계 Prandtl수	$u_i, u_j$ : 속도 변동(m/sec)
$P$ : 압력 변동	$V$ : 유도 전압(volt)
	$w_p, w_c, w_v, w_x, w_d$ : 속도 척도(m/sec)
	$W$ : 속도 변동(m/sec)
	$x_i, x_j$ : 직교 좌표
	$z_p, z_c, z_v, z_x, z_d$ : 거리 척도(m)
	$z$ : 아래 평판으로부터의 거리(m)

\*대우조선 연구개발부

\*\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

- $z^*$  : 무차원 거리
- $\beta$  : 부피 팽창 계수 ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
- $x$  : 분자 열확산 ( $\text{m}^2/\text{sec}$ )
- $x_t$  : 열의 와류 확산 ( $\text{m}^2/\text{sec}$ )
- $\theta$  : 온도 변동 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\theta_p, \theta_c, \theta_v, \theta_a, \theta_d$  : 온도 척도 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\nu$  : 분자 동점성 계수 ( $\text{m}^2/\text{sec}$ )
- $\nu_t$  : 운동량의 와류 확산 ( $\text{m}^2/\text{sec}$ )

### 1. 서 론

지금까지 두 평행한 수평평판 사이에서 일어나는 난류열대류에 관해 많은 연구가 있었음에도 불구하고 평균온도분포에 대한 논쟁이 끊이지 않고 있다. 난류열대류의 구조는 간단해 보이지만 점성과 열확산에 의한 운동량 이동률의 상대량을 나타내는 Prandtl수( $Pr$ )에 따라 그 구조를 달리하고 있다. Priestley<sup>(1)</sup>는 차원해석 및 역학이론으로 평균온도 구배는  $\frac{dT}{dz} \propto z^{-d}$ 이라는 지수법칙으로 표시될 수 있으며,  $d=4/3$ 인 소위 유사법칙을 제안하였다. Malkus<sup>(2)</sup>는 두 평판 사이의 유체층에서의 난류열대류에 변환법을 응용해  $d=2$ 를 예측하였다. 후에 Kraichnan<sup>(3)</sup>은 수정된 혼합거리이론을 적용하여 이들 지수법칙들을 보다 체계적으로 유도하였다. 그의 결과는 유체의  $Pr$ 수가 운동량과 열이 동일하게 전달되는 천이  $Pr$ 수( $Pr_0$ )보다 큰 경우에는 벽에 인접한 전도층과 유사층 사이에  $d=2$ 인 지수법칙층이 존재하며  $Pr_0$ 보다 적은 경우에는  $d=2$  지수법칙층이 없이 전도층에서 곧바로  $-4/3$  유사층이 전개됨을 보여주고 있다. 더 최근에 Panofsky<sup>(4)</sup>는 위치가 일정치 않은 경계층에서 Monin-Obukov의 척도와 대류척도 사이의 연결조건을 응용하여 Priestley의 유사층을 확인하였다. 실험실 및 대기중에서 많은 실험이 있었으나 평균온도구배의 지수법칙 분포에는 아직 논란의 여지가 많다.

또한 Townsend<sup>(5)</sup>, Goldstein & Chu<sup>(6)</sup>, Chu & Goldstein<sup>(7)</sup>과 Carrol<sup>(8)</sup>은 실험실의 대류실험장치에서  $d=2$ 인 지수법칙 분포를 얻었다. Croft<sup>(9)</sup>, Dyer<sup>(10)</sup>, Businger et al.<sup>(11)</sup>의 유동이 없는 자유대류 영역에서의 실험결과는  $d=1.5$ 의 관계를 보여주고 있다. 비록 Deardorff & Willis<sup>(12)</sup>의 공기에 대한 실험결과( $10^5 < Ra < 10^8$ )는  $d=2$ 에 좀 더 근접하는 지수법칙을 따르고 있으나, Rayleigh수( $Ra$ )가 더

커짐에 따라  $d$ 가  $4/3$ 에 접근하는 경향을 보여주고 있어서 Priestley<sup>(1)</sup>의 유사법칙은  $Ra$ 수가 무한대로 갈 때 생기는 점근적인 경우로 보여진다. 다른 난류경계층에서와 마찬가지로 Rayleigh 열대류는 점성층, 천이층, 대류층과 속도 결합층으로 구성되는 단순 난류 경계층과 같이 성층화된 구조를 갖고 있다. 성층화된 이와 같은 구조의 개념은 Kraichnan<sup>(3)</sup>과 Carrol<sup>(8)</sup>의 공기로 채워진 Rayleigh 열대류실험장치에서 관찰된 열구조에 관한 해석에서 채택된 바 있다. 그러나 Carrol<sup>(8)</sup>의 결과가 Kraichnan<sup>(3)</sup>의 3개의 성층화된 구조를 확인하지는 못했다. 대신에 그는 3개의 성층화된 구조는 아래 평판에 매우 가까이 있는 전도층,  $d=2$ 인 천이층,  $d \rightarrow \infty$ 인 내부영역으로 구성된다고 주장했다.

본 연구에서는 이와 같이 논란의 여지가 많은 문제점을 구간별 특성 척도 분석으로 보다 명확히 하고, 매질이 물과 공기인 경우 실험을 통하여 난류 열대류 구조를 분석하여 척도분석 및 Kraichnan<sup>(3)</sup> 등의 분석을 통해 확인된 바 있는 지수법칙층의 존재를 확인하고자 한다.

### 2. 특성척도

본 연구에서 Fig. 1과 같은 새로운 4개의 성층화 구조를 제안하는 바, 운동량과 열전달에 관한 주요한 작용을  $Pr \gg Pr_0$ (천이  $Pr$ 수)와  $Pr \ll Pr_0$ 인 두 가지 경우로 나누어 나타내고 있다(여기 천이  $Pr$ 수( $Pr_0$ )는 Kraichnan<sup>(3)</sup>의 제안에 의하면 0.1 정도로 추정되고 있다).

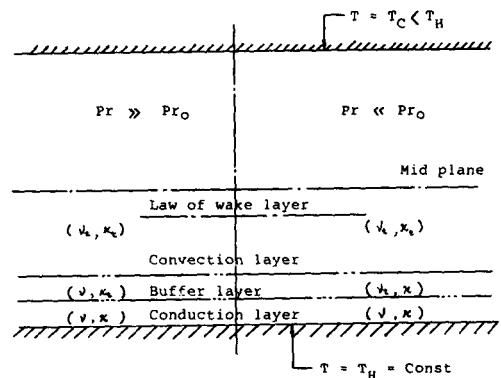


Fig. 1 A proposed four-layered structure and transport mechanisms in turbulent thermal convection

명백히 전도층에서의 전달과정은 분자점성( $\nu$ ) 분자열확산( $\chi$ )에 의해 지배된다. Long<sup>(13)</sup>에 의하면 대류층과 웨이크 또는 결함층(law of the wake or defect layer)에서는 운동량의 와류확산( $\nu_i$ )과 열의 와류확산( $\chi_i$ )에 의해서 이루어지는 것으로 보여진다.

또한 Fig. 1은  $Pr \gg Pr_0$ 인 경우 천이층에서의 전달과정은 분자점성과 열의 와류확산이 중요한 기구이고,  $Pr \ll Pr_0$ 인 경우는 운동량의 와류확산과 분자열확산이 중요한 기구임을 보여주고 있다.

평균유동이 없는 유동장에서의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x_j^*} (u_i^* u_j^* - \overline{u_i^* u_j^*}) = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{\chi}{w_p z_p} Pr \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^{*2}} + \frac{\theta_p z_p}{w_p^2} g\beta\theta^* \delta_{3i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left( \frac{\nu}{Pr w_p z_p} \frac{\partial T^*}{\partial x_j^*} - u_j^* \theta^* \right) \quad (2)$$

이 식들은 비압축성 유체의 운동량 방정식과 에너지 보존 방정식에 Boussinesq의 가정과 Reynolds의 분류방식에 의한  $\tilde{U}_i = U_i + u_i$ ,  $\tilde{T} = T + \theta$ ,  $\tilde{P} = P + p$ 가 쓰여졌고, 평균유동이 없으므로  $U_i = 0$ 이다. 여기서,  $u^* = \frac{u}{w_p}$ ,  $t^* = \frac{t}{w_p/z_p}$ ,  $x^* = \frac{x}{z_p}$ ,  $p^* = \frac{p}{w_p^2}$ ,  $\theta^* = \frac{\theta}{\theta_p}$ ,  $T^* = (T_H - T)/\theta_p$ 이며  $w_p$ 는 속도 척도,  $z_p$ 는 길이 척도,  $\theta_p$ 는 온도 결함 척도,  $T_H$ 는 아래 평판의 온도이다. 정상상태에서 총 동적 열전달량(kinematic heat flux)  $Q$ 는 유체층을 통해 일정하므로 측정치들  $w_p$ 와  $\theta_p$ 를 관련시키는 중요한 양이며 전층을 통해 다음과 같이 관련지어진다.

$$Q = w_p \theta_p \quad (3)$$

식 (1) 우변의 끝항은 부력항으로서 유체가 어느 점이든 난류대류운동을 하게 하는 매우 중요한 항인 반면에 다른 항들은 벽근처 영역에서만 중요하다. 이러한 관찰과 식 (3)은 다음과 같은 척도법칙에 이르게 한다.

$$\frac{g\beta Q z_p}{w_p^2} = 1 \quad (4)$$

### 2.1 대류 층

대류층에서 분자 확산항들이 무시할 수 있을만큼 적으므로 척도법칙 (4)를 사용하는 경우 식 (1)과 (2)는 어떤 무차원 그룹도 지니고 있지 않다. 변동

(fluctuations)이 큰 운동(large scale motion)의 특성 길이척도는 기하학적 형태에 의해 결정되는 것으로 알려져 있는바  $z_p$ 는 두 평판 사이 거리의 반인  $D$ 로 선택할 수 있다.

대류층에서의 특성척도를 “ $c$ ” 하첨자로 표시할 때 식 (3), (4)와 길이척도는 다음의 척도법칙을 만족하며, 이는 Deardorff<sup>(14)</sup>의 척도와 같다.

$$z_c = D \quad (5)$$

$$w_c = (g\beta Q z_c)^{1/3} \quad (6)$$

$$\theta_c = Q/w_c \quad (7)$$

### 2.2 열완충층

$Pr \gg Pr_0$ 이면 식 (2)의 분자 확산항은 무시할 수 있으나, 식 (1)의 분자 확산항은 상수로 표시될 수 있도록 되어야 한다. 따라서 편의상

$$\frac{\nu}{w_p z_p} = 1 \quad (8)$$

로 놓으면 식 (8), (3), (4)에 의해 다음과 같은 완충 척도법칙이 결정된다.

$$w_\nu = (g\beta\nu Q)^{1/4} \quad (9)$$

$$z_\nu = \frac{\nu}{w_\nu} \quad (10)$$

$$\theta_\nu = \frac{Q}{w_\nu} \quad (11)$$

유사하게  $Pr \ll Pr_0$ 이면 다음 법칙이 얻어진다.

$$w_\kappa = (g\beta\chi Q)^{1/4} \quad (12)$$

$$z_\kappa = \frac{\chi}{w_\kappa} \quad (13)$$

$$\theta_\kappa = \frac{Q}{w_\kappa} \quad (14)$$

### 2.3 전도 층

위아래 평판의 평균온도차의 반인  $\Delta T$ 의 대부분이 이 전도층에서 일어난다. Boberg<sup>(15)</sup>는 실험적으로  $\Delta T$ 가 전도온도결함척도  $\theta_0 = (Q^3/\chi\beta g)^{1/4}$ 와  $\frac{\Delta T}{\theta_0} = cPr^{1/4}$  ( $c$ 는 상수) 식으로 관계되어짐을 실험으로 발견했다.

Townsend<sup>(16)</sup>, Sommerscale & Dropkin<sup>(16)</sup>, Sommerscale & Gazda<sup>(17)</sup>, Goldstein & Chu<sup>(6)</sup>, Chu & Goldstein<sup>(7)</sup>과 Boberg<sup>(15)</sup>의 실험치에 의하면  $c = 3.5 \pm 0.25$ 이다. 이 관찰에 의하면 다음의 척도가 무차원 온도하락을  $Pr$ 수와 거의 무관하게 하는 척도이다.

$$w_a = (x^2 g\beta Q/\nu)^{1/4} \quad (15)$$

$$\theta_d = \frac{Q}{w_d} \quad (16)$$

전도층에서는  $\frac{\partial T}{\partial x_j} \gg u_j \theta$ 이다. 이것은 식 (2)의 에너지 방정식은 운동량 전달 과정과 무관하다는 것을 의미한다. 이층에서 적절한 온도길이 척도는 식 (2)에 의해

$$z_d = \frac{\chi}{w_d} \quad (17)$$

이다.

### 3. 구배연결과 지수법칙

두 인접한 층  $m$ 과 층  $n$ 에서의 평균온도 분포는 다음과 같이 척도된다고 가정하였다.

$$\frac{T_H - T_m}{\theta_m} = f_m\left(\frac{z}{z_m}\right) \quad (18)$$

$$\frac{T_H - T_n}{\theta_n} = f_n\left(\frac{z}{z_n}\right) \quad (19)$$

여기서  $T_m, T_n$ 는  $m$ 과  $n$  층에서의 온도,  $z_m, z_n$ 는 거리척도,  $\theta_m, \theta_n$ 는 온도 결함 척도(temperature defect scale)이다. 두 층의 접촉면에서 부드럽게 구배를 연결시키려면 다음 조건이 필요하다.

$$\frac{\theta_m}{z_m} = \frac{df_m(z/z_m)}{d(z/z_m)} = \frac{\theta_n}{z_n} \frac{df_n(z/z_n)}{d(z/z_n)} \quad (20)$$

#### 3.1 Case 1. $Pr \gg Pr_0$

식 (20)의 조건을 전도층과 완충층 사이의 접촉면에 적용하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{z}{z_d}\right)^2 \frac{df_d(z/z_d)}{d(z/z_d)} = \left(\frac{z}{z_v}\right)^2 \frac{df_v(z/z_v)}{d(z/z_v)} = \text{constant} \quad (21)$$

그러므로 여기서 다음과 같은 지수법칙을 얻을 수 있다.

$$\frac{dT}{dz} \propto z^{-2} \quad (22)$$

유사하게 열완충층과 대류층의 접촉면에서, Priestley<sup>(1)</sup>의 유사법칙을 얻을 수 있다.

$$\frac{dT}{dz} \propto z^{-4/3} \quad (23)$$

과거의 많은 실험에서 거론되어 온  $d=2$ 인 지수법칙은  $Pr \gg Pr_0$ 인 경우 전도층과 대류층 사이에 존재한다.

#### 3.2 Case 2. $Pr \ll Pr_0$

전도층과 열완충층 사이의 접촉면에서 구배일치

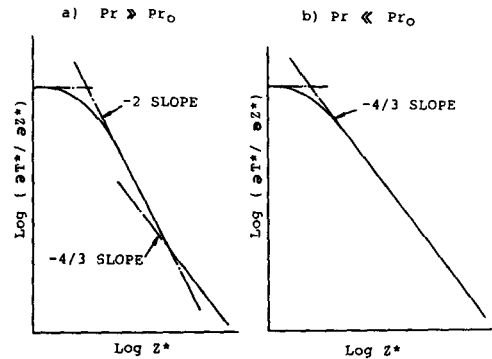


Fig. 2 Theoretical profiles of mean temperature gradients in turbulent thermal convection

조건은 아래식과 같으며

$$\frac{df_d(z/z_d)}{d(z/z_d)} = \frac{df_v(z/z_v)}{d(z/z_v)} = \text{constant} \quad (24)$$

이것은 다음과 같은 분포를 나타낸다.

$$(T_H - T) \propto z \quad (25)$$

열완충층과 대류층의 접촉면에서 식 (20)을 유사하게 적용하면 식 (23)의 Priestley 유사법칙도 이 영역 안에 있어야 함을 알 수 있다.

식 (25)의 직선분포가 의미하는 것은,  $Pr \gg Pr_0$ 일 경우 전도층이 내부유체까지 깊숙히 퍼져서 대류층과 직접 접촉하는 것을 의미한다. 즉  $d=-2$ 인 지수법칙층은  $Pr \gg Pr_0$ 인 경우에는 존재하지 않음을 나타낸다.

위와 같은 결과는 Kraichnan<sup>(3)</sup>의 혼합거리 분석과 동일하며 Fig. 2에 나타나 있다. 여러 실험에 의한 유사층의 존재에 관한 과거의 논쟁도 아래 평판에서 유사법칙을 증명할 수 있을 만큼 충분히 떨어진 곳까지 정밀하게 온도가 측정되지 않거나, 유체층이 유사층을 가질만큼  $Ra$ 수가 충분히 크지 않았거나 하는데 기인할 수도 있다.

후자의 기인도 Patel & Head<sup>(18)</sup>에 의하면, 단순 난류경계층이  $Re$ 수가 작아질수록 속도대수층(여기서 속도대수층은 열대류에서의 유사법칙층 즉  $-4/3$  지수층에 상응하는 것이다)이 사라짐을 상기할 때 정당화될 수 있다.

### 4. 평균온도분포식의 유도

난류열대류에서 평균온도분포를 구하는 것은 공학적으로 흥미있는 일이다.

Dean<sup>(19)</sup>은 난류경계층에서의 평균온도분포에 대해서, 점성층, 완충층, 대수층에서는 Spalding<sup>(20)</sup>의 내재함수(implicit function)을 이용하고 바깥층에서는 Finley<sup>(21)</sup>의 와류함수(wake function)을 이용하여 계산하였다. Musker<sup>(22)</sup>는 좀 더 편리한 공식을 얻기 위해서, 벽근처층 및 대수층에서 타당성 있는 난류와류점성에 관한 보간식을 제안하였다. Musker<sup>(22)</sup>의 방법을 난류열대류에 적용하면 평균온도분포를 나타내는 공식을 다음과 같이 얻을 수 있다. 와류확산 모델은

$$\overline{w\theta} = -\chi_t \frac{\partial T}{\partial z} \quad (26)$$

로 표시되며, 여기서  $\overline{w\theta}$ 는  $z$  방향의 동적열전달량(kinematic heat flux)이다. 수평방향으로 균일한 정상상태의 난류열대류장에서의 무차원 에너지 방정식은 아래와 같다.

$$\left(1 + \frac{\chi_t}{\chi}\right) \frac{\partial T^*}{\partial z^*} = 1 \quad (27)$$

전도층에서는  $k=0$ 이므로 평균온도분포가 직선형이라는 것은 쉽게 나타나고, 즉

$$T^* = z^* \quad (28)$$

이며 와류확산 계수는 벽에서의 거리의 3승에 비례하는 바 이의 유도과정은 다음과 같다. 운동량 방정식에서 no-slip 조건의 경우  $u \propto z$ 이고 이를 연속방정식에 대입하면  $v \propto z^2$ 를 얻을 수 있다. 이 관계를 에너지 방정식에 대입하면 식 (27)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\chi_t}{\chi} = cz^{*3} \quad (29)$$

여기서  $c$ 는 평균온도 실측치를 참조하여 얻을 수 있다.

완충층에서,  $Pr \gg Pr_0$ 인 경우  $\chi_t/\chi \gg 1$ 인 가정하에, 식 (22)의  $\frac{\partial T^*}{\partial z^*} \propto z^{*-2}$ 인 지수법칙과 식 (27)의 에너지 방정식에서 다음과 같은 추정을 할 수 있다.

$$\frac{\chi_t}{\chi} \propto z^{*2} \quad (30)$$

마찬가지로 유사층에서는  $\frac{\chi_t}{\chi} \gg 1$ 이므로 식 (27)에

$\frac{\partial T^*}{\partial z^*} \propto z^{*-4/3}$ 인 지수법칙을 대입하면

$$\frac{\chi_t}{\chi} = \frac{1}{\alpha} z^{*4/3} \quad (31)$$

을 추정할 수 있다. 여기서  $\alpha$ 는 실험상수이다.

바닥에서 수직거리를 따라  $\chi_t/\chi$ 의 변화를 이 둘 지수관계식 (29)와 (31)을 보간하여 나타내면

$$\frac{1}{\chi_t/\chi} = \frac{1}{cz^{*3}} + \frac{\alpha}{z^{*4/3}} \quad (32)$$

이고, 이는 식 (29), (30), (31)의 요구조건을 만족시킨다.

즉  $z^* \rightarrow 0$ 이면  $\chi_t/\chi \rightarrow z^{*3}$ 이고

$z^* \rightarrow \infty$ 이면  $\chi_t/\chi \rightarrow z^{*4/3}$ 이고

$z^*$ 의 중간층에서는  $\chi_t/\chi \rightarrow z^{*2}$ 이다.

여기서 상수  $c$ 는 유체에 무관한 수로 보이며  $\alpha$ 는  $Pr$ 수에 의존하는 것으로 믿어지고  $\alpha$ 의 크기에 따라 완충층(-2 지수법칙층)의 두께가 결정된다.

식 (32)를 에너지 방정식 (27)에 넣으면 아래 식이 되며

$$\frac{\partial T^*}{\partial z^*} = \frac{1 + \alpha cz^{*5/3}}{1 + \alpha cz^{*5/3} + cz^{*3}} \quad (33)$$

식 (33)을 적분하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$T^* = \int_0^{z^*} \frac{1 + \alpha cz^{*5/3}}{1 + \alpha cz^{*5/3} + cz^{*3}} dz^* \quad (34)$$

식 (34)가 편리한 식으로 표시할 수 없음은 유감이요. 그러나 평균온도분포를 계산하기 위해서는 간단한 삼각법칙을 이용해 식 (34)를 쉽게 적분할 수 있다.

## 5. 실험 장치 소개

### 5.1 시험 장치

본 시험 장치에서는 아래 평판을 높은 온도로, 위 평판을 낮은 온도로 일정하게 유지하는 것이 매우 중요하다.

평판에서의 부분적인 열점을 주위로 빨리 확산시켜 온도장을 어느 시간에서든 거의 동일하게 하기 위하여, 열전도도가 높은 알루미늄판(90cm×90cm×0.5m)을 사용하였다. 위 평판을 냉각시키기 위하여 차가운 물을 사용하였고 아래 평판을 가열하기 위해 전열선으로 온도가 일정하게 유지되는 물 탱크에서 나오는 더운물을 사용하였다.

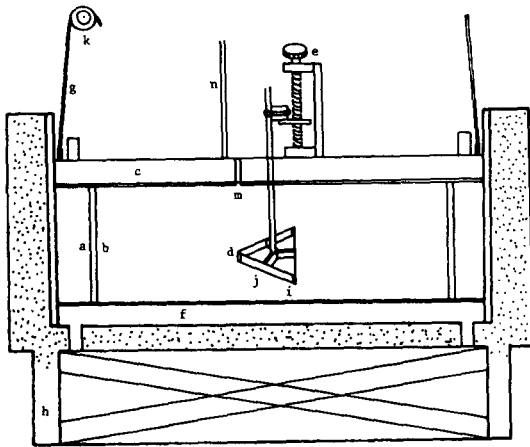
물의 통로는 평판 온도의 차이를 극소화하기 위하여 인접 통로의 물 흐름 방향을 반대로 하여 관속에 장치하였다. 통로의 크기는 90cm×8cm×1cm이며 아크릴과 알루미늄판으로 둘러싸여 있다.

물의 통로에 직접적인 수압이 걸리는 것을 방지하기 위하여 통로와 대기를 연결하는 플라스틱 관으로 된 안전 장치를 위 평판에 부착하였다. 또 다른 중요한 것은 열벽을 통한 열손실을 무시할 수 있을 정도로 작게 유지하는 것이다. 벽의 바깥쪽은 10cm 두께의 스티로폼으로 단열시켰고, 또한 큰

실험 상자(90cm×90cm×24cm) 안에 또 다른 작은 상자(74cm×74cm×24cm)를 설치하여 열손실을 최소화하였다. 안쪽의 상자는 매질이 물인 경우 실험시 물의 누출을 방지하기 위하여 에폭시 및 실리콘 고무로 잘 밀봉하였다.

통로를 흐르는 찬물의 유량을 일정하게 하기 위하여 배출 위치를 흡입 위치보다 높게 놓았으며, 이렇게 하여 각 통로에 같은 압력이 걸려 유량이 일정하게 되었다.

각 평판의 온도가 일정한가를 알기 위하여 각 평판에 4개씩의 열전대(thermocouple)를 장치하였으며, 모든 점에서의 온도차는 0.2℃ 미만이었다. 측정장치(probe), 측정 높이 또는 측정 매질을 바꾸기 위하여 위 평판은 풀리를 통해 현가장치에 매달리게 하였다. 실험 장치의 개략도는 Fig. 3에 나타나 있다.



- a: Outside chamber(90×90×30cm)
- b: Inside chamber(74×74×12 or 24 cm)
- c: Cold water channel
- d: Probe
- e: Probe lifting system
- f: Hot water channel
- g: Wire rope
- h: Frame angle
- i: Thermocouple(position is controlled with fine screw)
- j: Pt-Pt Rh thermocouple
- k: Pulley
- l: Styrofoam
- n: Safety device to avoid pressure
- m: Thermocouple position control hole

Fig. 3 Test section

### 5.2 측정 장치

온도 측정은 Al-Ch 열전대와 Pt-Pt Rh 13% 열전대 등 두 가지의 다른 재료로 온도를 측정하였다.

여러 점에서 온도를 동시에 측정하기 위해 Fig. 4와 같은 삼각 지지대에 4개의 열전대를 장착하였다. 매 열전대의 위치는 열전대와 아크릴 지지대를 연결하는 미세한 나사로 조정하였다. 매 열전대가 아래 평판에 닿았는가를 알기 위해 열전대와 아래 평판에 묻은 전선과의 저항을 측정하였는 바 닿았을 경우의 저항은 20Ω 정도였다. 4측정점의 높이 차이는 이러한 방법으로 0.1mm 이내로 조정되었다. 매 열전대에서의 평균온도 차이는 0.05℃ 미만이었으며 이러한 점으로 보아 평균온도를 한점에서만 측정하더라도 심각한 오차는 없을 것으로 보인다. 여기서 Deardorff & Willis<sup>(12)</sup>의 실험결과에 의하면 열대류실 내부에 존재하는 큰 규모의 에디(energetic eddy)의 파장을 대략적으로 5D 정도라고 한다. 따라서 본 실험 경우는 높이에 따라 60cm, 120cm 정도의 파장을 갖는 에디들에 실려 매우 미세한 규모로 빠르게 변동하는 온도장의 수평 평균치를 측정하는 것이므로 삼각지지대와 지지봉에 의한 평균온도장의 변화는 거의 없는 것으로 판단된다. 실제로 Deardorff & Willis(1967)와 Boberg<sup>(15)</sup>에서도 그 영향이 무시될 정도의 것임이 밝혀졌다.

물에서 측정된 전도층은 1mm 이하였는 바 작은

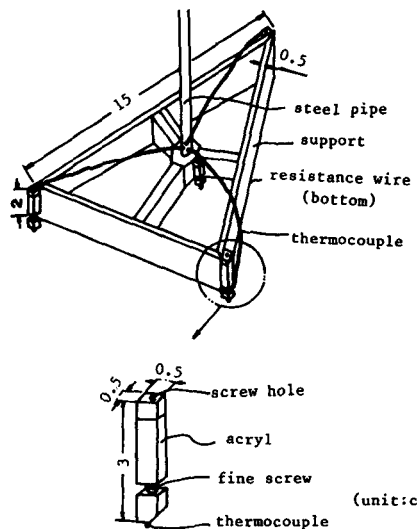


Fig. 4 Triangular support of thermocouple

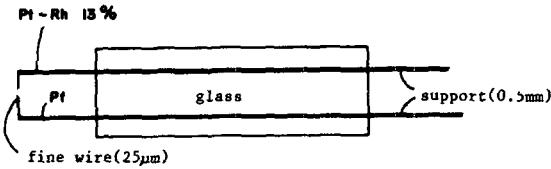


Fig. 5 Pt-Pt Rh Thermocouple

용접점 (bead)를 갖는 열전대가 필요하였다.

이를 위해 본 연구에서는 특별히 고안된 측정 장비가 사용되었는데 Fig. 5에서 보는 바와 같이 직경 0.5mm의 Pt 지지대, Pt-Rh 13% 지지대와 25µm의 미세선들로 구성된다.

지지대와 미세선을 용접하기 위해서 우선 미세선을 지지대에 감은 후 끝부분을 산소 아세틸렌 화염에 대어 용접시킨다. 미세선을 지지대에 감는 이유는 미세선이 화염에 닿으면 바로 녹아 없어지기 때문에 미세선에서 지지대로의 열전달을 촉진시켜 녹아 없어지는 것을 방지하기 위해서이다. 다음에는 두 미세선을 접합시키기 위해서, 적정하게 자른 두 미세선을 접촉시켜 놓고 여기에 2.5V 정도의 전류를 흘리면 접촉점에 생기는 저항으로 열이 많이 발생해 두 점이 용접된다. 용접 후 두 지지대 사이의 저항은 3.5Ω 정도이었다. 저항이 이보다 큰 경우는 용접이 확실하지 않은 경우이므로 확인이 필요하다. Pt-Pt Rh 열전대의 10°C와 25°C 사이에서의 온도 전압 관계는 식 (35)로 표시된다.

$$T = 0.1684V + 1.0774 \quad (35)$$

측정 장치들의 높이는 0.0005인치까지 측정할 수 있는 다이알 게이지가 장착된 미세 조정 나사로 조정되었다.

이 Pt-Pt Rh 열전대는 지지대 중심에 장착하여 미세한 난류온도까지 측정하여 Al-Ch 열전대로 측정한 평균온도의 정확성을 검증하는데 사용하였다.

실제 측정결과 두 가지 열전대의 측정온도는 거의 구별할 수 없을 정도(0.02°C 미만)이었다.

### 5.3 온도 조절 장치

아래 평판을 가열하기 위한 더운물의 온도는 써미스터(thermister)를 이용한 온도 조절기로 조정되었다. 이 원리는 지정 온도와 물의 온도 차이는 물 탱크내의 써미스터(40Ω)로 측정되어 triac으로 조정되는 가열기를 작동시키는 것으로 계통도(block diagram)은 Fig. 6에 나타나 있다.

### 5.4 자료 측정 장치(Data Acquisition System)

온도는 HP 3050B 자료 측정 장치를 이용하여 측정하였다. HP 3490A 멀티미터(multimeter)의 자료수집율(scanning rate)은 3data/1sec이며 HP 3495A 스캐너(scanner)로 실험치를 채취하였다. 평균온도와 표준편차는 매점에서 1분 이내에 채취하였다. 총 측정시간은 30~40분 정도이고 한 점에서의 측정수는 40~60개로 하였다.

## 6. 실험결과

### 6.1 공 기

#### (1) 열전달량 측정

본 실험은  $6.13 \times 10^5 \leq Ra < 1.33 \times 10^7$  사이에서 행해졌고 안정된 상태는 실험장치를 가동한 후 5~7시간 후에 얻어졌다. 무차원 온도  $T^*$ 와 무차원 높이  $z^*$ 의 관계는 Fig. 8에 나타나 있다. Nusselt수( $Nu$ )는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Nu = \frac{H}{H_0} = \frac{k_w}{k_f} \frac{D}{T} \left( \frac{dT}{dz} \right)_w \quad (36)$$

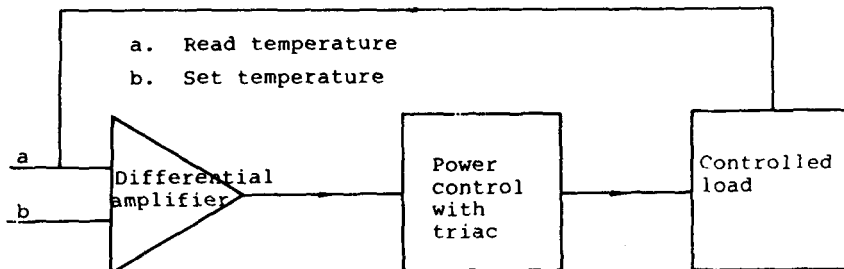


Fig. 6 Block diagram of temperature controller

Table 1 Experimental condition for air

No.	Temp. diff.(°C)	Height(cm)	Aspect ratio	Ra No.	Nu No.
1	2.6	12	6.17	$6.13 \times 10^5$	6.13
2	5.8	12	6.17	$1.30 \times 10^6$	7.65
3	4.6	24	3.08	$8.12 \times 10^6$	12.90
4	6.2	24	3.08	$8.90 \times 10^6$	13.23
5	6.9	24	3.08	$1.06 \times 10^7$	14.05
6	9.28	24	3.08	$1.33 \times 10^7$	14.92

여기서  $\left(\frac{dT}{dz}\right)_w$ 는 벽에서의 온도구배이다.

온도구배는 전도층에서 선형인 바, 전도층에서 OLS(ordinary least square) 방법으로 온도구배를 구해 전도 열 전달량을 산출하였다. 실험 조건은 Table 1에 나타나 있다.

두 평판 사이의 온도차는 Boussinesq approximation을 만족시키기 위하여 10°C를 넘지 않도록 하였으며 벽면의 영향을 무시하기 위하여 장폭비(aspect ratio)를 3 이상으로 하였다.

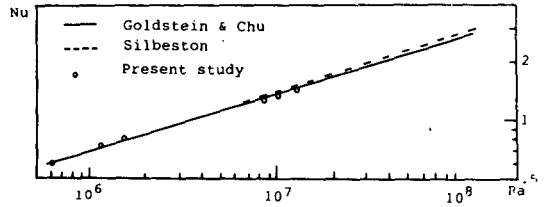


Fig. 7 Relation between Nusselt number and Rayleigh number for air

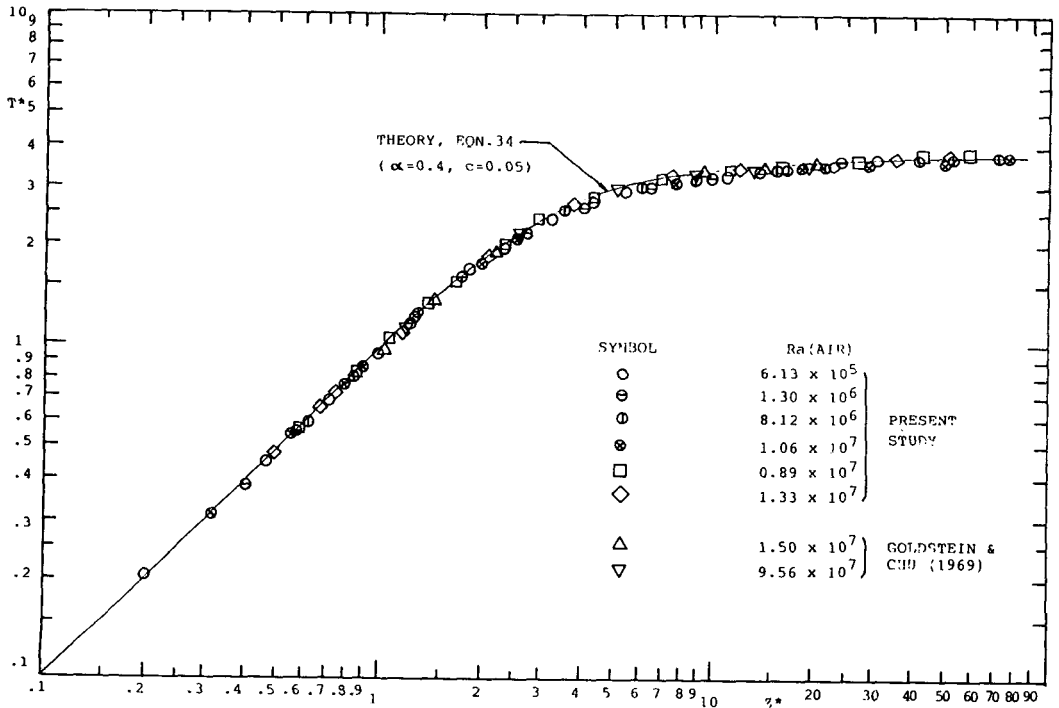


Fig. 8 Mean temperature profiles in Rayleigh convection of air



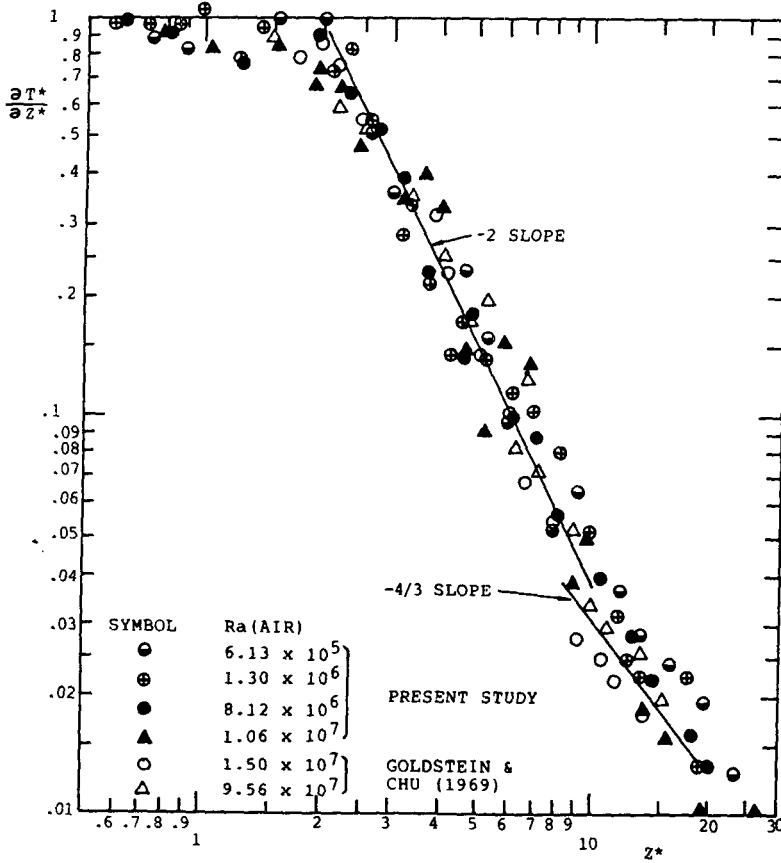


Fig. 9 Mean temperature gradient profiles in Rayleigh convection of air

$Nu$ 수와  $Ra$ 수와의 관계식은, Goldstein & Chu<sup>(6)</sup>는 실험적으로

$$Nu = 0.123 Ra^{0.294} \quad (37)$$

으로, O'Toole & Silveston<sup>(23)</sup>은

$$Nu = 0.104 Ra^{0.305} Pr^{0.084} \quad (38)$$

으로 제안하였는 바, Fig. 7에서 보는 바와 같이 본 실험 결과는 다른 사람의 제안과 거의 일치함을 알 수 있었다.

(2) 온도분포

실측된 무차원 평균온도분포는 Fig. 8에 나타내었으며 온도구배  $\frac{\partial T^*}{\partial z^*}$ 와  $z^*$ 의 관계는 Fig. 9에 보였다.

이에 의하면  $2 < z^* < 9$  사이에서  $z^{-2}$  지수법칙층이 있음을 보여주고  $z^* > 10$ 인 경우에는 특정치가 산만하게 분포되어 있기는 하나 대략적으로  $z^{-4/3}$  지수법칙이 있음을 알 수 있다. 이러한 온도구배

분포에 의해

$0 < z^* < 1.5$ 에는 전도층

$2 < z^* < 9$ 에는 천이층

$10 < z^*$ 에는 대류층

의 3가지 다른 영역이 존재함을 알 수 있다.

6.2 물

본 실험은  $Ra$ 수가  $9.01 \times 10^7$ ,  $1.07 \times 10^8$ 인 두 경우에 대해 행하여졌고 안정된 난류상태는 약 10 시간 후에 일어났다. 무차원 온도  $T^*$ 와 무차원 높이  $z^*$ 의 관계는 Fig. 10에 나타나 있다. 전도층의 두께는 매우 얇았고 실험조건은 Table 2에 나타나 있다.

온도구배 분포는 Fig. 11에 나타나 있고, 공기에서와 마찬가지로  $2 < z^* < 9$ 에서는  $z^{-2}$  지수법칙층이 있음을 알 수 있었고,  $z^* > 10$ 에서는  $z^{-4/3}$  지수법칙이 있음을 대략적으로 알 수 있었으나, 이 법

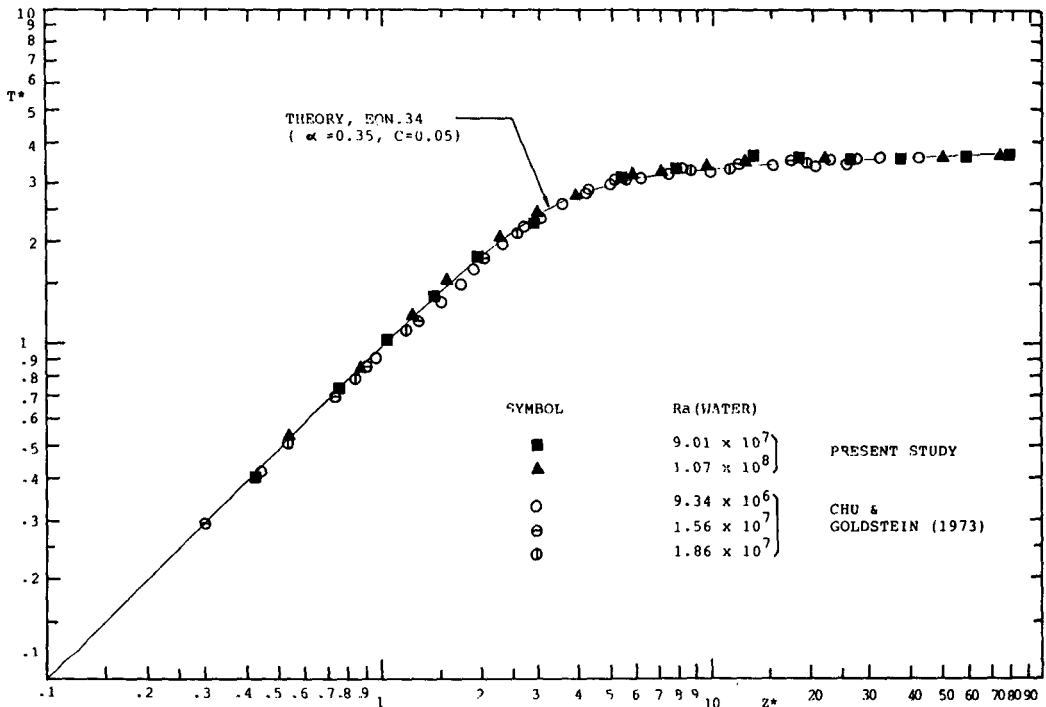


Fig. 10 Mean temperature profiles in Rayleigh convection of water

Table 2 Experimental condition for water

No.	Temp. diff.(°C)	Height(cm)	Aspect ratio	Ra No.	Nu No.
1	5.2	12	6.17	$9.01 \times 10^7$	30.34
2	5.6	12	6.17	$1.07 \times 10^8$	31.69

칙을 보다 더 확실하게 확인하려면 이 구역에서는 온도측정을 0.01°C까지 정확하게 측정되어야 함을 알게 되었다.

7. 결론 및 토의

두 수평판 사이의 난류열대류 열전달에서 유체층이 층류화된 구조를 갖는다는 가정하에, 세 가지의 특성척도를 구성하여, 실험적인 방법으로 평균온도 분포구조를 분석하는데 이용하였다.

두 인접층 사이에서 적절한 척도로 무차원된 온도구배 분포들을 연결시키니 Kraichnan<sup>(3)</sup>과 같은 결과가 나왔다. Fig. 8, 10에서의 온도분포는  $\alpha = 0.35 \sim 0.4, c = 0.05$  값을 가진 식 (34)로 연관지어

질 수 있다. 그러나 얻을 수 있는 제한된 수의 자료로는 최적의  $\alpha$ 를 구하기 힘들므로 매 경우의 최적상수를 찾아 Fig. 8, 10에 표시하였다. Fig. 8에서  $\alpha = 0.4, c = 0.05$ 를 갖는 이론적 곡선이 실험치와 매우 잘 맞는다. 부력결합층은  $T^*$ 가 이론곡선보다 높은 중심영역으로 구분될 수 있다. 물에 대한 Fig. 10에서  $T^*$ 가  $1.5 < z^* < 4$ 에서 이론곡선보다 작다. 이것은  $d = 2$ 인 완충층이  $Pr$ 수가 높은 유체에서는 두꺼우므로, 이미 예측된 바 있다. 이 영역 밖에서는 실험치가 이론적 예측과 잘 맞는다. 모든 실험치들은 서로 좋은 상관관계를 보여주며 제안된 좌표로 4개의 층 구조를 명백히 구분할 수 있었다.

Kraichnan<sup>(3)</sup>에 의하면 공기와 물의  $Pr$ 수가  $Pr_0$

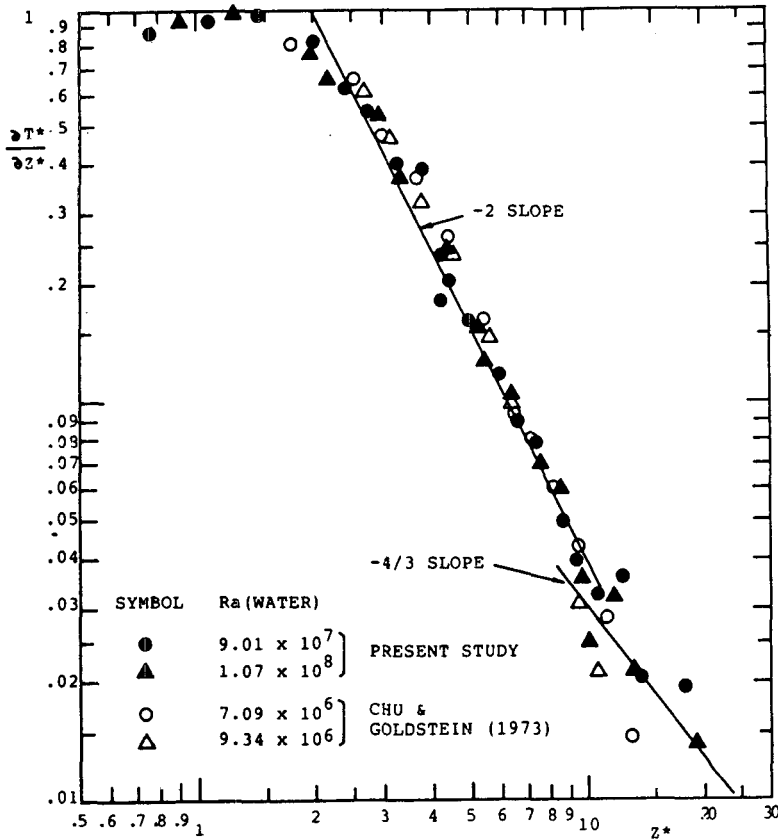


Fig. 11 Mean temperature gradient profiles in Rayleigh convection of water

보다 큰 경우에 해당하므로 Fig. 9, 11과 같이 유체 층의 평균온도 분포가 거의 직선화된 전도층,  $\frac{dT}{dz} \propto z^{-2}$ 인 완충층,  $\frac{dT}{dz} \propto z^{-4/3}$ 인 대류층 혹은 유사층으로 구성됨은 이론적 예측과 일치한다.  $-4/3$  온도구배의 유사층은 유체의 중심부에 존재하고 그 위치는 Fig. 9, 11에 의하면  $z^* > 10$ 인 곳에서 나타남을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) Priesley, C. H. B., 1955, "Convection from a Large Horizontal Surface", Aust. J. Phys., Vol. 7, p. 176.  
 (2) Malkus, W. V. R., 1954a, "Discrete Transitions in Turbulent Convection", Proc. Roy. Soc., A225, p. 185.  
 Malkus, W. V. R., 1954b, "The Heat Transfer and Spectrum of Thermal Turbulence", Proc. Roy. Soc., A225, p. 196.  
 (3) Kraichnan, R. J., 1962, "Mixing-Length Analysis of Turbulent Thermal Convection at Arbitrary Prandtl Numbers", Phys. Fluids, Vol. 5, p. 1374.  
 (4) Panofsky, H. A., 1978, "Matching in the Convective Planetary Boundary Layer", J. Atmos. Sci., Vol. 35, p. 272.  
 (5) Thomas, D. B. and Townsend, A. A., 1957, "Turbulent Convection over a Heated Horizontal Surface", J. Fluid Mech., Vol. 2, p. 473.  
 (6) Goldstein, R. J. and Chu, T. Y., 1969, "Thermal Convection in a Horizontal Layer of Air", Prog. Heat Mass Transfer, Vol. 2, p. 55.  
 (7) Chu, T. Y. and Goldstein, R. J., 1973, "Turbulent Convection in a Horizontal Layer of Water", J. Fluid Mech., Vol. 60, p. 141.  
 (8) Carrol J. J., 1976, "The Thermal Structure of Turbulent Convection", J. Atmos. Sci., Vol. 33, p. 642.  
 (9) Croft, J. F. 1958, "The Convection Region and

- Temperature Distribution above a Horizontal Heated Surface", *J. Roy. Met. Soc.*, Vol. 84, p. 418.
- (10) Dyer, A. J., 1965, "The Flux Gradient relation for Turbulent Heat Transfer in the Lower Atmosphere", *J. Roy. Met. Soc.*, Vol. 91, p. 151.
- (11) Businger, J. A., Wyngaard, J. C., Izumi, Y. and Biadley, E. F., 1971, "Flux-Profile Relationship in the Atmospheric Surface Layer", *J. Atmos. Sci.* Vol. 28, p. 181.
- (12) Deardorff, J. W. and Willis, G. E., 1967a, "Investigation of Tubulent Convection between Horizontal Plates", *J. Fluid Mech.*, Vol. 28, p. 675.
- Deardorff, J. W. and Willis, G. E., 1967b, "The Free Convection Temperature Profile", *J. Roy. Met. Soc.*, Vol. 93, p. 166.
- (13) Long, R. R., 1976, "Relation between Nusselt Number and Rayleigh Number in Turbulent Thermal Convection", *J. Fluid Mech.*, Vol. 73, p. 445.
- (14) Deardorff, J. W., 1970, "Convective Velocity and Temperature for the Unstable Planetary Boundary Layer and for Rayleigh Convection", *J. Atmos. Sci.*, Vol. 27, p. 1211.
- (15) Boberg, T. E., 1977, "An Experimental Study on Unsteady free Convection from a Heated Horizontal Plate", M. S. Thesis, Dept. of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, U.S.A.
- (16) Sommerscale E.F.C and Dropkin, D., 1966, "Experimental Investigation of the Temperature Distribution in a Horizontal Layer of Fluid Heated from below", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 9, p. 1189.
- (17) Sommerscale E.F.C and Gazda I. W., 1969, "Thermal Convection in High Prandtl Number Liquids at High Rayleigh Numbers", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 12, p. 1491.
- (18) Patel, V. C and Head, M. R., 1969, "Some Observations of Skin Friction and Velocity Profiles in Fully Developed Pipe and Channel Flows", *J. Fluid Mech.*, Vol. 38, p. 181.
- (19) Dean, R.B, 1976, "A Simple Formula for the Complete Velocity Profile in Turbulent Boundary Layer", *J. Fluid Eng.*, Vol. 98, p. 723.
- (20) Spalding, D.B., 1961, "A Single Formula for the Law of the Wall", *J. Appl. Mech. Tran. ASME Series E.*, Vol. 83, p. 455.
- (21) Finley, P.J., Phoe K.C. and Poh, C.J., 1966, "Velocity Measurements in a thin Turbulent Water Layer", *La Houille Blanche*, Vol. 21, p. 713.
- (22) Musker, A.J., 1979, "Explicit Expression for the Smooth Wall Velocity Distribution in a Turbulent Boundary Layer", *AIAA J.*, Vol. 17, p. 655.
- (23) O'Tool, e J. L. and Silvestion, P. L., 1961, "Correlation of Convective Heat Transfer in Confined Horizontal Layers", *Chem. Energy Prog. Symp.*, Vol. 32, p. 81.