

용기의 온도변화와 수직관류가 동시에 작용하는 성층유체의 과도유동

박준상* · 현재민**

A temperature adjustment process of stratified fluid induced simultaneously by sidewall thermal variation and vertical through-flow

Jun Sang PARK and Jae Min HYUN

Key Words: Stratified fluid(성층유체), Vertical through-flow (수직관류), Heat-up(히트업)

Abstract

An analytical study is made of transient adjustment process of an initially stationary, stably-stratified fluid in a square. The boundary walls are highly-conducting. The overall Rayleigh number R_a is large. Considerations are given to both opposing ($\delta w/\delta T > 0$) and cooperating ($\delta w/\delta T < 0$) configurations. The flow character in opposing configuration can be classified into (a) a forced-convection dominant mode ($\delta w/\delta T > 1/\sqrt{2}$), (b) a buoyancy-convection dominant mode ($0 < \delta w/\delta T < 1/\sqrt{2}$), and (c) a static mode ($\delta w/\delta T \cong 1/\sqrt{2}$). Global evolutionary processes are depicted, and physical rationalizations are provided.

1. 서론

밀폐용기 내의 유체의 성층화와 관련된 연구는 solar heating system 의 에너지 저장에서와 같은 buoyancy driven flow 가 중요한 많은 공학 혹은 과학 문제로 자리잡고 있다. 이와 관련해서 중요한 문제가 밀폐용기 내의 유체의 성층화 과정에 대한 연구이다.

밀폐용기 내의 안정된 성층유체를 생성하는 방법은 차가운 아래 수평벽과 뜨거운 위 수평벽 사이에 유체를 담아 열전도에 의해 내부 유체가 선형적인 온도 분포를 갖고 정지한 상태로 성층화를 이루게 하는 것이다. 이때 수직방향의 측벽

은 완전한 단열조건을 만족해야 한다. 이때 성층화를 위한 시간척도는 $O(H^2/\alpha)$ 이다. 여기서 H 는 아래, 위 수평벽 사이의 거리이고 α 는 유체의 열전도계수이다.

위에서 언급한 시스템을 보다 현실적인 모델로 확장하면 수직측벽의 단열조건을 완화하는 것이다. Walin⁽¹⁾ 은 유한 열전도도를 가진 수직측벽을 통한 외부와의 heat flux 조건을 고려하여 수직측벽의 열전도도가 작은 경우에 대한 내부 유체의 정상 온도분포방정식을 구했다. 이를 바탕으로 Rahm & Walin⁽²⁾ 은 수직벽의 불완전 단열조건 하에서 수평벽을 통한 수직관류를 이용하여 내부유체의 효과적인 성층화에 대한 실험적인 기법을 제시했다. Rahm⁽³⁾ 은 poor conducting sidewall 의 가정으로부터 수직측벽 근처의 경계층을 선형화시켜 수직관류를 이용한 성층화 과정에 대한 비정상 해석해를 제시했고, Hyun & Hyun⁽⁴⁾이 수치해석을 통해 이를 검증했다.

* 한라대학교

** 한국과학기술원

또 다른 형태의 성층화 과정에 대한 비정상 유동 연구는 heat-up problem 으로 잘 알려진 수직벽의 온도변화에 따른 또 다른 평형상태로의 비정상 과정에 대한 연구가 그것이다. 이 문제에 대한 이론적인 연구는 Jischke & Doty⁽⁵⁾, Sakurai & Matsuda⁽⁶⁾ 등에 의해 이루어 졌다.

앞서 언급한 용기 내의 성층유체의 비정상 유동에 대한 연구는 (1) 수직 판류를 고려한 경우는 수직판류에 의한 대류효과가 초기 성층화 과정에 대한 주된 driving force 이고, (2) 용기벽의 온도변화에 의한 heat-up process 에서는 부력효과가 주된 driving force 이다. 따라서 성층화 과정에서 두 힘 중 어느 하나가 지배적인 경우에 해석은 비교적 잘 알려져 있다고 할 수 있다. 한편 수직판류에 의한 대류 효과와 용기벽의 온도변화에 의한 부력효과가 대등한 경우에 대한 연구는 아직 이루어지지 않았고, 이것이 본 논문에서 다루고자 하는 문제이다. 두 효과가 동시에 나타나는 경우는 용기외부의 온도변화를 동반하는 수직판류 성층유동 문제에서 흔히 나타날 수 있는 실제 문제이다.

본 논문에서는 matched asymptotic analysis 를 통해 수평벽을 통한 through flow의 강도 (δw) 와 수직벽의 thermal forcing (δT) 의 비에 따라 과도특성을 크게 (a) opposing case ($\delta w/\delta T > 0$) 와 (b)co-operative case($\delta w/\delta T < 0$)로 나눌 수 있고 opposing case 는 다시 forced convection dominant mode, natural convection dominant mode 및 static mode 로 나눌 수 있다는 것을 보이고 각 경우의 고유한 특성을 상세히 기술했다.

2. 지배방정식

동점성계수 ν , 열전도계수 κ , 및 열팽창계수 α 를 갖는 비압축성 Boussinesq 유체가 종횡비 1을 갖고 열전도도가 매우 높은 벽(highly conducting wall)으로 만들어진 이차원 사각용기에 담겨있다.

초기에 유체는 정지한 상태로 수직방향으로 안정한 성층화를 이루고 있고 갑자기 실린더 측벽에 균일한 온도증가와 아래, 위판을 통한 유출입에 의한 작은 섭동이 가해진다고 가정하자. 따라서 유체의 초기 온도는

$$T^* = \frac{1}{2} \left\{ (T_T^* + T_B^*) + (T_T^* - T_B^*) \frac{z^*}{L^*} \right\}$$

이다. 여기서 T_T^* , T_B^* 는 각각 위판, 아래판의 온도를 의미한다.

다음의 무차원 변수를 도입하면 [예, Jischke & Doty⁽⁵⁾]:

$$\nabla^* \equiv L^* \nabla, \quad p = \frac{p^* - p_r^*}{\varepsilon \rho_0^* g^* L^* \beta_0^* \Delta T^*},$$

$$T = \frac{T^* - T_r^*}{\varepsilon \Delta T^*}, \quad (u, w) = (u^*, v^*) \frac{\sigma^{1/2}}{\varepsilon L^* N^*},$$

$$t = t^* N \sigma^{1/2},$$

여기서 $\Delta T^* \equiv T_T^* - T_B^*$, 상첨자 * 는 차원 변수, 하첨자 r 은 초기의 기준값, 하첨자 0 는 초기 원점 ($z=0$)에서의 기준값을 나타내고 $\varepsilon \ll 1$ 그리고 σ 는 Prandtl 수 $\sigma = \mu_0^* C_{\rho 0}^* / \kappa^*$ 를 N 은 Brunt-Vaisala frequency $N = (\beta_0^* \Delta T^* g^* / L^*)^{1/2}$ 를 의미한다.

앞의 정의를 이용하여 무차원화된 선형방정식을 구하면

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + R_a^{-1/2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} + T + R_a^{-1/2} \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\sigma \frac{\partial T}{\partial t} + w = R_a^{-1/2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

을 얻을 수 있다. 여기서 R_a 는 Rayleigh 수

$R_a = \rho_0^{*2} g^* L^3 \beta_0^* \Delta T^* C_{\rho 0}^* / \kappa_0^* \mu_0^*$ 를 의미한다.

본 논문에서는 초기, $t = 0$, 일 때 수직벽의 온도를 $T[\equiv T_w] = \delta T$ 만큼 갑자기 균일하게 증가시키며 동시에 아래, 위판을 통한 $w[\equiv W_w] = R_a^{-1/4} \cdot \delta w$ 만큼의 흡입, 방출을 시킨 후의 비정상 온도 및 유동장의 연속적인 진화 특성에 대한 연구가 본 연구의 목적이다. 따라서 관련 초기 및 경계조건을 나타내면 :

$$t=0 : T = u = 0 \quad (5)$$

$$x = \pm 1 : T[\equiv T_w] = \delta T, u = w = 0 \quad (6)$$

$$z = \pm 1 : T = \delta T, u = 0, w[\equiv W_w] = R_a^{-1/4} \cdot \delta w \quad (7)$$

이다.

3. 과도유동해석, $t \sim O(R_a^{1/4})$

$R_a \gg 1$ 인 경우 시간척도 $t \sim O(R_a^{1/4})$ 동안에 발생하는 유동특성은 내부 영역의 비정상 비점성 유동(영역 I), 수직벽 근처의 부력 경계층의 준정상 유동(영역 II), 수평벽 근처의 비정상 점성 경계층 유동으로 나눌 수 있다 (영역 III & IV) [Jischke & Doty⁽⁵⁾, Sakurai & Matsuda⁽⁶⁾]. 문제의 좌우 대칭성으로부터 영역 $0 \leq x \leq 1$ 에 대한 해를 구하는 것으로 충분하다.

문제의 해를 $\Phi = \Phi_i + \Phi_{vb} + \Phi_{hb}$ 로 가정하여 각 영역의 해를 잘 알려진 matched asymptotic method를 이용해 풀자. 여기서 Φ 는 임의의 유동변수, 하첨자 i, vb, hb 는 각각 내부 비점성 유동, 수직 경계층, 수평 경계층의 해를 의미한다. 이전의 여러 연구에서 이미 알려진 대로 주 유동 및 수직 경계층 영역의 길이 척도는 $O(1)$ 와 $O(R_a^{-1/4})$ 이고 수평 경계층은 $O(R_a^{-1/6})$ 와 $O(R_a^{-1/8})$ 의 이중 길이 척도를 가진다.

3.1 내부 주 유동 해석 (영역 I)

Heat up 시간척도로 시간을 스케일 ($\tau \equiv R_a^{-1/4} t$) 하고 변수들을 Jischke & Doty⁽⁵⁾ 의 방법으로 각 변수의 의미있는 최저차는 $u = R_a^{-1/2} u_i$, $w = R_a^{-1/4} w_i$, $T = T_i$, $p = p_i$ 이고, 다음과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다:

$$\partial w_i / \partial z = 0, \quad (14a)$$

$$\partial p_i / \partial x = 0, \quad (14b)$$

$$\partial p_i / \partial z = T_i, \quad (14c)$$

$$\sigma \partial T_i / \partial \tau + w_i = 0. \quad (14d)$$

윗 식으로부터 유동 변수 w_i , T_i , p_i 들이 시간 τ 만의 함수임을 알 수 있다.

3.2 수직 경계층 유동 해석 (영역 II)

수직 경계층이 만들어지는 시간척도는 $O(R_a^{-1/2})$ 이기 때문에 heat-up 시간척도 $t \sim O(R_a^{-1/4})$ 의 비정상해석에서는 수직 경계층

은 준정상 상태임을 알 수 있다.

수직 경계층에서의 각 변수의 스케일은

$$u = R_a^{-1/2} u_{vb}, \quad w = w_{vb}, \quad T = T_{vb},$$

$$p = R_a^{-1/2} p_{vb} \text{ 이고 수직 경계층 관련 공간좌}$$

표는 각각 $\eta = R_a^{1/4}(1-x)$ 이다.

앞의 경계층 변수를 방정식 (1)-(4)에 대입하여 온도와 속도에 대한 방정식을 구하면

$$T_{vb} + \partial^2 w_{vb} / \partial \eta^2 = 0, \quad (15a)$$

$$w_{vb} - \partial^2 T_{vb} / \partial \eta^2 = 0 \quad (15b)$$

이다.

경계조건은 $\eta=0$ 인 경우 $w_{vb}=0$,

$$T_i + T_{vb} = \delta T \text{ 이고}$$

$\eta \rightarrow \infty$ 인 경우 $w_{vb}, T_{vb} \rightarrow 0$ 이다.

위 경계조건을 만족하도록 방정식 (15a), (15b)를 풀면

$$T_{vb}(\tau, \eta) = (\delta T - T_i(\tau)) e^{-\eta/\sqrt{2}} \cos(\eta/\sqrt{2}), \quad (16a)$$

$$w_{vb}(\tau, \eta) = (\delta T - T_i(\tau)) e^{-\eta/\sqrt{2}} \sin(\eta/\sqrt{2}), \quad (16b)$$

이다.

결과적으로 아직 $T_i(\tau)$ 를 구하는 문제가 남아있다.

$T_i(\tau)$ 는 다음과 같은 간단한 global mass continuity 조건으로부터 구할 수 있다:

$$\int_0^1 w_i dx + \int_0^\infty w_{vb} d\eta = \delta w. \quad (17)$$

식 (14d), (16b), (17) 로부터

$$\sigma \frac{\partial T_i}{\partial \tau} + \frac{1}{\sqrt{2}} T_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \delta T - \delta w, \quad (18a)$$

이다. 초기 조건 $T_i(\tau=0) = 0$ 을 만족하는 위 방정식의 해는

$$T_i(\tau) = (\delta T - \sqrt{2} \delta w) (1 - e^{-\tau/(\sqrt{2} \cdot \sigma)}), \quad (18b)$$

이고, 식(14d) 로부터

$$w_i(\tau) = (\delta w - \frac{\delta T}{\sqrt{2}}) e^{-\tau/(\sqrt{2} \cdot \sigma)} \quad (18c)$$

를 얻을 수 있다.

위 식 (16) & (18) 의 결과는 수평벽 부근의 수평 경계층 영역을 제외한 내부 주유동과 수직 수직 경계층 영역에서의 과도 유동 특성을 보여준다. 보다 완전한 through flow를 동반한

heat-up process 해석을 위해서는 수평 벽 부근 유동에 대한 해석이 필요하다. 수평경계층 (영역 III & IV)의 해석은 Park & Hyun⁽⁷⁾ 을 참조하라.

4. 물리적 해석

4.1 Opposing case ($\delta w \cdot \delta T > 0$)의 온도 성층화

여기서 opposing case 는 through flow 효과는 내부 비점성영역 (그림 2에서 영역I)유체를 cool-down (or heat-up) 시키고 측벽의 온도변화에 의한 효과는 내부유체를 heat-up (or cool-down) 시키는 경우, 즉 $\delta w \cdot \delta T > 0$ 인 경우로 정의한다. $\delta w > 0$ (or $\delta w < 0$) 이면 내부유체는 cool-down (or heat-up)되고, $\delta T > 0$ (or $\delta T < 0$) 이면 내부유체는 heat-up (or cool-down) 된다는 것을 명심하라. 이후에 나타나는 본 절의 설명에서는 편의상 $\delta w > 0$, $\delta T > 0$ 인 경우에 대한 설명을 하고자 한다.

4.1.1 Forced convection dominant mode, ($\delta w/\delta T > 1/\sqrt{2}$)

Fig. 1에 $\delta w/\delta T > 1/\sqrt{2}$ 인 경우에 대한 대표적인 과도 유동특성이 그려져 있다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 측벽의 온도증가와 수평벽을 통한 수직방향의 상향유동이 가해진 경우, heat-up 시간 척도에 비해 매우 짧은 $t \sim O(1)$ 의 시간 경과 후 수직 측벽 부근에 Quasi-steady vertical boundary layer 가 생긴다. 이 과정에서 내부 비점성 영역(영역I)에서는 아래의 차가운 유체를 위로 밀어올리는 수직유동에 의해 cool-down process를 겪게되고 차가워진 내부유체와 수직벽 사이의 온도차 증가에 의해 강화된 수직경계층 유동이 수평벽으로부터 들어온 유체 중 더 많은 유량을 수직경계층을 통해 위로 전달시키고 이로 인해 내부 비점성 영역의 수직유동은 점차 약해진다(Fig. 1(C) 참조). 이와 같은 과정을 통해 내부 비점성 영역의 유체는 또다른 평형상태 (정지한 상태로 온도 $T_i(\tau \rightarrow \infty) = \delta T - \sqrt{2}\delta w$ 인 상태)를 찾아간다.

(식(18)을 보라.) 이상에서 설명한 $\delta w/\delta T > 1/\sqrt{2}$ 인 경우에 대한 비정상 특성이 그림 3에 잘 나타나 있다.

Fig. 1은 $\delta w/\delta T > 1/\sqrt{2}$ 인 경우 초기 시간에 아래쪽 수평벽을 통해 유입된 유량의 일부가 수직 경계층을 통해 위로 이동하고 내부 비점성영역의 유동은 수평벽으로부터 직접적인 vertical through flow 에 의해 일어난다는 것을 잘 보여주고 있다. 따라서 이 경우 그림 3의 내부 비점성 영역의 과도특성은 수직벽 근처의 부력 효과보다 수평벽을 통한 대류효과에 더 많이 지배된다고 볼 수 있고, 정상상태의 유동패턴은 안정하게 성층화된 유체를 담은 용기의 아래 위 수평벽을 통한 mass transfer 가 수직, 수평 경계층을 통해 일어난다는 기존의 연구결과와 일치하는 모습을 보여준다. (참조, Ralm⁽³⁾; Hyun & Hyun⁽⁴⁾)

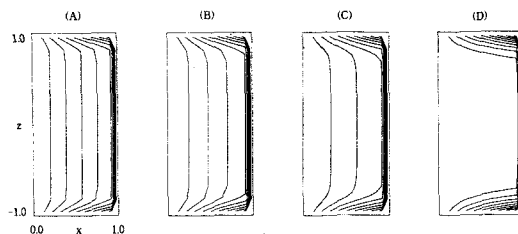


Fig. 1 Plots of stream function for the forced convection-dominant mode [$\delta w = 2.0$, $\delta T = 1.0$]. Times, τ , are : (A), 0.3; (B), 1.0; (C), 2.0; (D), ∞ . $\sigma = 1.0$ and $R_a = 10^8$.

4.1.2 Natural convection dominant mode, ($0 < \delta w/\delta T < 1/\sqrt{2}$)

$\delta w/\delta T < 1/\sqrt{2}$ 인 경우 과도시간동안 위쪽 수평벽을 통해 유출되는 유량 보다 수직경계층이 아래에서 위로 pumping 하는 유량이 더 많다. 따라서 아래 수평벽을 통해 들어온 유량은 모두 수직경계층을 통해 위로 전달되고, 수직경계층을 통해 위로 전달된 유량은 모두 위 수평벽을 통해 방출 될 수 없기 때문에 일부가 내부 비점성영역으로 되돌려지게 되어 내부 비점성 영역에서는 위에서 아래로 내려가는 수직 하강 유동이 생기고 이로 인해 내부 비점성 영역의 유체는 위쪽 뜨거운 유체의 수직 하강 유동에 의한 heat-up process를 겪게 되고 시간이 지남에 따라 내부

유체는 온도가 증가하게 된다. 이때 시간이 지남에 따라 수직벽과 내부유체 사이의 온도차 감소가 일어나고 결과적으로 수직경계층 유동이 점점 약화된다. 이와 같은 과정을 통해 시간이 지남에 따라 내부 비점성 영역의 유체는 또다른 평형상태 (정지한 상태로 온도 $T_i(\tau \rightarrow \infty) = \delta T - \sqrt{2} \delta w$ 인 상태)를 찾아간다.

Fig. 2 는 이상의 설명을 잘 보여주고 있다.

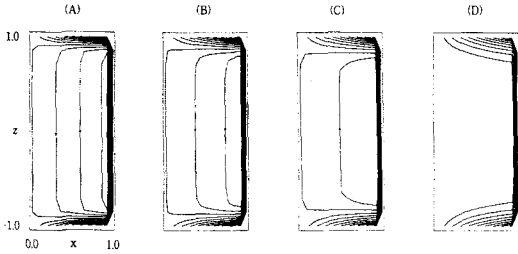


Fig. 2 Plots of stream function for the buoyant convection-dominant mode [$\delta w = 1/2$, $\delta T = 1.0$]. Times, τ , are : (A), 0.3; (B), 1.0; (C), 2.0; (D), ∞ . $\sigma = 1.0$ and $R_a = 10^8$.

4.1.3 Static mode, ($\delta w / \delta T = 1/\sqrt{2}$)

$R_a \gg 1$ 일 때, $\delta w / \delta T = 1/\sqrt{2}$ 인 경우 3장의 해석 결과 식(18)로부터 알 수 있듯이 내부유체는 시간 척도 $t \sim O(R_a^{1/4})$ 동안 초기의 상태 ($T_i(\tau) = 0$ & $W_i(\tau) = 0$) 를 그대로 유지한다. 이것은 heat-up 시간 척도 $t \sim O(R_a^{1/4})$ 보다 매우 짧은 $t \sim O(1)$ 동안에 형성된 수직 경계층이 수평벽을 통한 수직류를 완전히 흡수하기 때문이다. 결과적으로 Static mode 인 경우 전 유동 영역에 대한 유선의 global pattern은 앞서 언급한 두 mode 의 정상상태의 모습과 거의 같다.

4.2 Co-operative case ($\delta w \cdot \delta T < 0$)의 온도층화

여기서 정의한 co-operative case 는 수평벽을 통한 through flow의 대류 효과와 수직 측벽의 온도변화에 의한 부력효과 다같이 내부 비점성 영역의 유체를 cool-down (or heat-up) 시키는 경우, 즉 $\delta w \cdot \delta T < 0$ 인 경우로 정의한다. $\delta w > 0$ & $\delta T < 0$ 이면 내부유체는 cool-down 되고,

$\delta w < 0$ & $\delta T > 0$ 이면 내부유체는 heat-up 된다는 것을 명심하라. 이후에 나타나는 본 절의 설명에서 편의상 $\delta w > 0$ & $\delta T < 0$ 인 경우에 대한 설명을 하고자 한다.

Fig. 3에서 알 수 있는 것처럼 $\delta w \cdot \delta T < 0$ ($\delta w = 1.0$ & $\delta T = -2.0$)인 경우 초기 측벽의 온도 감소에 기인한 측벽 근처 수직 경계층에서 발생한 하강유동으로 인한 재순환 유동의 모습을 볼 수 있다. 이 재순환 유동으로 인해 아래 수평벽으로부터 유입된 유체가 내부 비점성 영역을 통해 바로 위쪽 수평벽으로 전달된다. (Fig. 3(A) 참조) 그리고 시간이 지남에 따라 내부 유체는 수직 상승류에 의한 cool-down process를 겪는다. 계속된 cool-down process에 의해 내부 유체의 온도가 측벽의 온도에 접근해 가면 측벽 근처 수직 경계층의 하강유동 강도가 약해지면서 재순환 유동의 모습도 점차 약화되어 측벽 근처로 재순환 유동 영역이 줄어든다. (Fig. 3(B) 참조) 수직 유동에 의한 cool-down process 가 더욱 진행되면 내부 비점성 영역 유체의 온도가 측벽의 온도보다 낮아지게 되고 측벽 수직 경계층에서 발생하는 부력의 방향이 바뀌어 수직 경계층의 유동이 아래에서 위로 바뀐다. 이 이후의 process 는 opposing case 의 convection dominant process 와 흡사하게 된다. 즉, 수직 유동에 의해 내부 유체의 온도가 하강하면 내부유체와 수직 측벽의 온도차에 의해 발생하는 수직 경계층의 강도가 세어지고 이로 인해 아래 수평벽으로부터 유입된 유량의 많은 부분이 내부 비점성영역 보다 수직 경계층을 통해 위 수평벽으로 전달되는 과정이 진행되며, 이와 함께 내부

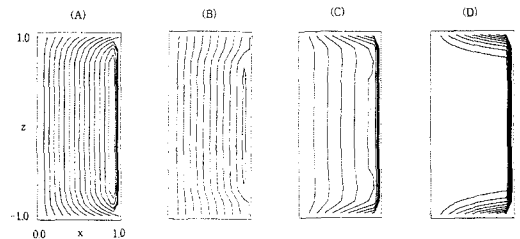


Fig. 3 Plots of stream function for the buoyant convection-dominant mode [$\delta w = 1.0$, $\delta T = -2.0$]. Times, τ , are : (A), 0.3; (B), 1.0; (C), 2.0; (D), ∞ . $\sigma = 1.0$ and $R_a = 10^8$.

영역의 수직 속도는 점차 감소하여 내부 비점성 영역의 유체는 또다른 평형상태인 정지한 성층 유체의 최종 상태로 접근한다 (Fig. 3(C) & (D) 참조).

6. 결론

정지한 상태로 안정화된 성층유체를 담고있는 highly conducting wall 로 만들어진 사각형 용기 내의 Boussinesq 유체의 과도 특성을 벽의 온도 변화와 수평벽을 통한 vertical through flow 가 동시에 가해지는 경우에 대해 matched asymptotic method를 통해 해석하고 물리적인 특성을 상세히 논의 했다.

과도상태에 대한 유동 및 온도장의 특성은 측벽의 온도변화 (δT) 와 수평벽을 통한 유체의 출입 속도 관련 수 (δw)의 비에 의해 결정되고, 이들의 과도 특성은 수직관류에 의한 대류효과와 측벽의 부력효과 내부 비점성유동에 반대 방향으로 영향을 미치는 opposing case ($\delta w/\delta T > 0$ 인 경우) 와 동일한 방향으로 영향을 미치는 co-operative case ($\delta w/\delta T < 0$ 인 경우)로 나누어 짐을 보였다.

참고문헌

- (1) Walin, G., 1971, "Contained Non-homogeneous Flow under Gravity or How to Stratify a Fluid in the Laboratory," *J. Fluid Mech.*, Vol. 48, pp. 647-672.
- (2) Rahm, L. and Walin, G., 1979, "On thermal convection in stratified fluids," *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, Vol. 13, pp. 51-65.
- (3) Rahm, L., 1986, "On the thermal adjustment of an almost enclosed region with through-flow," *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 29, pp. 1479-1485.
- (4) Hyun, J.M. and Hyun, J.C., 1986, "Adjustment of a thermally-stratified fluid in a container with vertical through-flow," *Int. J. heat & mass transfer*, Vol. 29, pp. 1487-1493.
- (5) Jischke, M.C. and Doty, R.T., 1975,

"Linearized buoyant motion in a closed container," *J. Fluid Mech.*, Vol. 71, pp. 729-754.V.

(6) Sakurai, T. and Matsuda, T., 1972, "A temperature adjustment process in a Boussinesq fluid via a bouncy-induced meridional circulation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 54, pp. 417-421.

(7) Park, J.S. and Hyun, J.M., 2001, "Transient Process of a Confined Induced Simultaneously by Sidewall Thermal Loading and Vertical Through-flow", submitted to *J. Fluid Mech.*