

일방향 주기적 진동하는 원통 내의 유동 및 열전달 연구

박준상*†

A Study on Flow and Heat Transfer in One Directional Periodic-Oscillating Cylinder

Jun Sang Park*†

Key Words : Cool-down Process(냉각프로세스), Natural Convection(자연대류), Periodical Oscillation(주기적 진동), Thermal Island(열섬)

ABSTRACT

A study has been made of cool-down process on an incompressible fluid contained in a periodically oscillating cylinder when an abrupt cooling of wall temperature is imposed. Characteristics of flow and heat transfer are investigated along the variations of oscillating frequency and amplitude. One found the flow regimes are divided into 4-modes : 1 thermal island mode, 2 thermal island mode, 4 thermal island mode and asymmetry mode. Comprehensive analysis for each mode are given with a physical mechanism on cool-down process.

1. 서 론

본 연구에서는 밀폐된 원통형 용기 내부에 들어있는 상온 상태의 액체를, 원통형 용기 벽의 온도를 순간적으로 변화시키면서 동시에 수평방향으로 주기적인 일방향 진동을 가하여 가열(혹은 냉각)시키는 문제를 다루고자 한다.

용기 내부 액체의 냉각에 관한 연구는 유동 및 열전달에 대한 기본 물리현상 연구를 위한 순수 과학적인 측면에서 뿐만 아니라 공학적인 응용을 위한 다양한 관점에서 연구되고 있다. 특히 등온 상태의 액체를 담고 있는 실린더형 용기의 외벽 온도를 갑자기 올린 (내린) 후에 발생하는 내부 유체의 비정상 유동 및 열전달 특성은 heat-up (cool-down) process 로 알려진

현상이다. 선형문제에 대한 연구는 Walin(1971), Sakurai & Matsuda(1972), Jischke & Doty(1975)에 의해 행해졌고, 비선형 문제를 포함하는 보다 포괄적인 문제에 대한 리뷰는 Hyun(1994)에 의해 정리되었다.

본 연구에서는 이전의 연구에서 주로 다루었던 온도차에 의해 발생하는 부력이 중요한 역할을 하는 가열문제(heat-up problem)가 아닌, 용기의 주기적인 진동에 의해 발생하는 문

제에 초점을 맞추었다. 우주공간에서와 같은 미소중력환경 하에서는 중력의 작용에 의한 부력이 생성되지 않기 때문에 자연대류열전달을 기대할 수 없다. 따라서 우주환경 하의 열전달 촉진 기술개발은 미소중력 유체역학(micro gravity fluid mechanics) 분야의 주요연구 테마 중 하나이다. 외부에서 인위적인 주기적인 외력을 가해 용기의 가속도를 유발시키면 이에 해당하는 체적력, 즉, 중력요동(gravity gitter)을 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 이 힘을 이용하여 내부 유체의 열전달을 촉진시킬 수 있는 연구를 수행하고자 한다.

이전에 행해진 중력요동 관련 연구를 살펴보면 대부분의 연구가 외부유동 문제에 국한되어 있다는 것을 알 수 있다 [Gershuni & Lyubimov(1998)]. 이외 대표적인 연구가 Amin(1988), Antohe & Lage(1997), Park & Hyun(2004) 등이 있다.

본 논문에서는 용기의 주기적인 진동이 heat-up 시간척도에 어떻게 영향을 미치는 지를 알아보고 보다 짧은 시간에 유체를 냉각시키는 최적의 운전조건을 찾고자 한다. 그리고 이 조건하에서 발생하는 유동 및 열전달 특성을 분석하고자 한다.

본 연구에서 시도하는 주기적인 외부 가진에 의한 용기의 진동은 내부 유체의 시간에 따른 관성력의 변화를 가져온다. 이로 인해 유체는 체적력(body force)의 변화에 따른 상대운동을 하게 되고, 이때 발생하는 상대유동이 용기벽으로부터 내부유체로 일어나는 열전달을 여러 가지 형태로 변화시키는 또 다른 요인으로 작용한다. 해석결과로부터 보다 자세히

* 한라대학교 기계자동차공학부

† 교신저자, E-mail : jspark@halla.ac.kr

알 수 있겠지만, 본 연구에서 다루고자하는 유동변수의 범위에서 일어나는 열전달은 이전의 연구에서 주로 다루었던 부력에 의한 자연대류보다는 가진에 의한 강제대류가 열전달 과정을 압도적으로 지배하는 경우이다. 따라서 본 연구에서 나타나는 유동 및 열전달 특성을 결정짓는 주된 변수는 용기의 가진 주파수(f^*)와 최대진동속도의 크기(A^*)가 된다.

본 연구에서는 일방향 진동 문제에 대한 주파수(f^*)와 최대진동속도크기(A^*)의 변화에 따른 유동 및 열전달 특성을 자세히 분석하고, 이들 특성이 몇 개의 서로 다른 특성을 갖는 영역으로 나누어질 수 있음을 밝혔다.

2. 수학적 모델

물을 담고 있는 반경 L^* 인 실린더형 원통을 생각하자 [Fig.1 1 참조]. 동점성 계수 ν , 열확산 계수 α 를 갖는 원통 내부의 유체는 원통의 초기 온도와 같은 등온상태로 정적인 초기상태를 유지하는 것으로 가정한다. 본 연구에서는 초기상태(T_i^*)의 물을 담고 있는 원통의 온도를 갑자기 T_w^* 로 heat-up 시킨 후, 동시에 원통을 수평방향(x-방향)으로 주기적으로 흔들면서($u_w^* = A^* \sin(2\pi f^* t)$, $v_w^* = 0$), 내부 유체의 온도변화를 고찰하고자 한다. 앞서의 언급에서 상첨자 *는 차원변수, 하첨자 w는 용기를 의미한다.

작동유체의 물성은 Boussinesq 가정을 통해 온도변화에 따른 밀도변화효과를 다음과 같이 고려했다.

$$\rho^* = \rho_i^*(1 - \beta(T^* - T_i^*)), \tag{1}$$

여기서 하첨자 I 는 초기상태를 의미하고, β 는 유체의 열팽창계수를 나타낸다.

수평, 수직속도(u, v), 온도(T), 압력(p) 및 좌표계(x, y, t)에 대해 아래와 같은 무차원화를 수행하면,

$$(x, y) = (x^*/L^*, y^*/L^*), \quad t = t^* f^*,$$

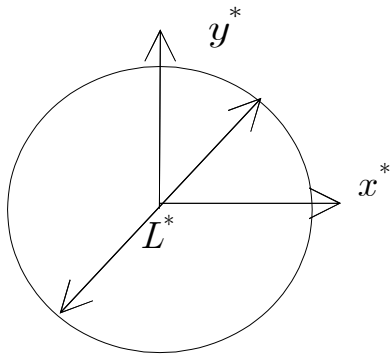


Fig. 1 Coordinate system

$$(u, v) = (u^*/f^*L^*, v^*/f^*L^*), \quad T = (T^* - T_i^*) / (T_i^* - T_w^*), \\ p = p^* / \rho_i^* (f^* L^*)^2$$

용기와 같이 움직이는 이동좌표계에 대한 다음과 같은 무차원 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \tag{2}$$

$$(1 - \epsilon T) \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{R_e} \nabla^2 u - 2\pi\delta(1 - \epsilon T) \cos(2\pi t) \tag{3}$$

$$(1 - \epsilon T) \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{R_e} \nabla^2 v \tag{4}$$

$$(1 - \epsilon T) \frac{DT}{Dt} = \frac{1}{P_r R_e} \nabla^2 T \tag{5}$$

위 방정식에 나타나는 무차원수는 다음과 같이 정의된다.

$\epsilon \equiv \beta \Delta T$, $\delta \equiv A^* / f^* L^*$, $R_e \equiv f^{*2} L^* / \nu$, $P_r \equiv \alpha / \nu$, 여기서 $\nu \equiv \mu / \rho_i^*$, $\Delta T = T_i^* - T_w^*$ 이다. 물리적으로 이들 무차원수는 다음과 같이 설명될 수 있다: ϵ 은 온도변화에 의한 유체의 체적팽창량, δ 는 용기의 직경과 진동 변위의 비, R_e 는 레이놀즈수, P_r 은 프란틀수를 나타낸다.

지배방정식(2)-(5)와 관련된 초기 및 경계조건은 다음과 같다:

$$u(x, y, t = 0) = v(x, y, t = 0) = T(x, y, t = 0) = 0, \tag{6}$$

$$u(x^2 + y^2 = 1, t) = v(x^2 + y^2 = 1, t) = 0,$$

$$T(x^2 + y^2 = 1, t) = -1. \tag{7}$$

3. 수치계산

수치 시뮬레이션을 위해 상용 S/W 인 Fluent를 사용했다. 따라서 수치계산은 원시변수(primitive variable)를 사용하는 관성좌표계에 대한 방정식에 대한 해석을 수행하였다. 계산은 층류영역 범위 내에서 수행되었다. 정확한 비정상 해석을 위해 2배수정밀도(double precision), 2차차분기법(2nd order difference scheme)을 선택했다. 그리고 수렴 정밀도는 연속 및 운동량방정식에 대해서는 상대오차를 10^{-3} 이내, 에너지방정식에 대해서는 10^{-6} 이내로 설정했다. 그리고 시간에 따른 경계조건을 주기위해서 사용자 정의함수(user defined function)기능을 사용했다.

여러 횟수의 시험계산(test run)을 통해 아래 그림과 같은 grid system(grid point 6400개)을 채택했다. 벽근처의 경계층 유동을 보다 자세히 보기 위해 벽근처에서는 밀집된 그리드시스템(stretched structured grid system)을, 내부 영

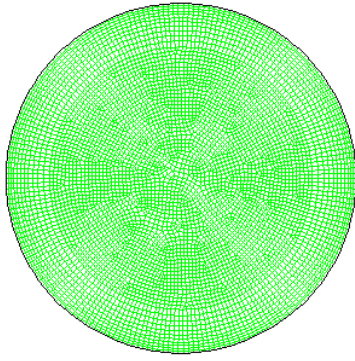


Fig. 2 Grid system

역에서는 mesh 크기 차이가 많이 나지 않는 비정규사각격자 시스템(unstructured pave mesh system)을 채택했다. 사실 본 문제의 경우 원통 축에서 경계조건을 알 수 없기 때문에 내부 영역에서 원통형 정규격자시스템을 사용하는 것은 불가능하다.

모든 계산에 사용된 물성치는 1기압 상온 $15^{\circ}C$ 의 물을 기준으로 계산했다, 즉, $\alpha = 0.141 \times 10^{-6} m^2/s, \beta = 15.073 \times 10^{-5} K^{-1}, \nu = 1.14 \times 10^{-6} m^2/s$. 그리고 모든 계산에서 용기의 크기 $L^* = 8cm$, 초기온도 $T_i^* = 30^{\circ}C$, 온도차 $\Delta T = 25^{\circ}C$ 로 고정시켰다.

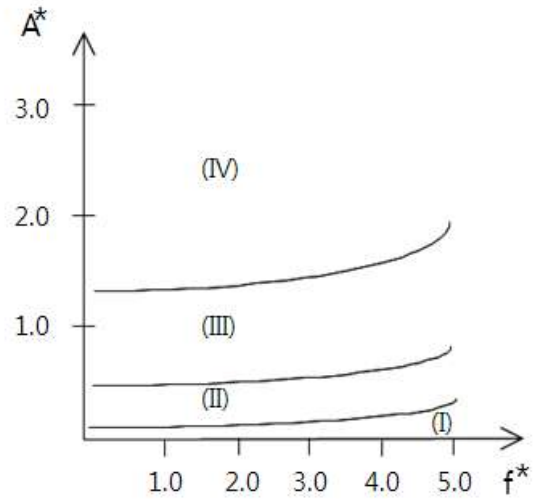
계산은 본 논문의 주된 관심인 유동인자, 가진의 진폭 (A^*)와 가진주기(f^*)의 변화에 초점을 맞추어 $0 < A^* \leq 4.0(m/s)$, $0 < f^* \leq 5.0(1/s)$ 의 범위에서 50경우에 대한 해석을 수행하였다. 무차원수를 $\epsilon = 3.77 \times 10^{-3}$, $P_r = 8.06$ 로 고정시키고, $0.01 < \delta < 50$, $0 < R_e < 1.75 \times 10^8$ 의 범위에서 계산을 수행했다.

그 결과 유동 및 온도장이 다음 장에서 언급할 4가지-모드로 나누어진다는 것을 발견했다. 아래 그림은 계산결과로부터 얻어진 모드 다이어그램이다.

4. 결과 및 토의

4.1 열전달 메카니즘

용기가 오른쪽으로 가속될 때 유체의 상대속도는 진동방향에 평행한 수평방향의 벽 근처에서 가장 크게 나타나고 [Fig.3(A)], 이로 인해 실린더 내부에는 대칭 수평축을 중심으로 커다란 두개의 반대방향으로 (위쪽에서는 시계방향, 아래쪽에서는 반시계방향으로) 회전하는 선회유동이 발생한다 [Fig.3(A)]. 용기 벽 부근에서 차가워진 유체가 두 선회유동이 만나는 용기의 오른쪽 벽 부근에서 내부영역으로 유입되며, 수평축 부근에서는 대류에 의한 냉각효과가 극대화된다. 이때 내부로 유입되는 유체는 중심축을 가로질러 왼쪽의 반대편 벽까지 도달하지 못한다. 왜냐하면 진동의 이전 주기



(I) 1-thermal island mode, (II) 2-thermal island mode, (III) 4-thermal island mode, (IV) asymmetric mode

Fig. 3 Regime diagram

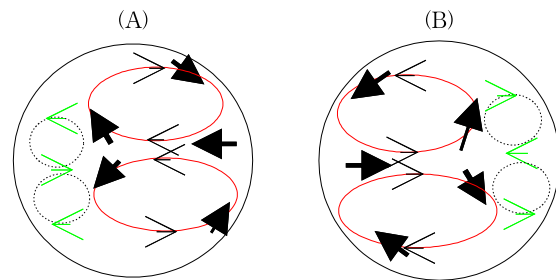


Fig. 3 Schematics of the flow patterns: (A), the case accelerated to the right; (B), the case accelerated to the left.

(왼쪽으로 가속되는 주기)에서 발생한 반대방향 유동(왼쪽에서 오른쪽으로 움직이는 유동)이 저항하기 때문이다. 결과적으로 왼쪽벽 부근에서는 이전 주기에서 발생한 두개의 선회유동이 축소된 형태로 Fig.3(A)에서처럼 나타난다. 이 축소된 선회유동은 용기가 왼쪽으로 가속되는 주기에 다시 오른쪽의 선회유동을 압도하며 왼쪽벽 근처에서 차가워진 유체를 내부로 실어 나르는 역할을 한다. 이와 같은 상호 반복적인 작용으로 인해 내부 온도는 진동축을 따라 보다 효과적으로 냉각되게 된다 [Fig.3(B)]. 이것이 진동으로 인한 냉각 프로세스에서 가장 중요한 메카니즘이다. Fig.3은 앞서 설명한 메카니즘에 대한 개략도이다.

앞서 언급한 메카니즘에 의한 냉각작용이 일어날 때 냉각 효율에 영향을 미치는 주요 인자는 차가운 벽 근처의 유체 덩어리가 한번의 진동주기에 얼마나 깊이 내부 영역으로 침투해 들어가느냐 하는 것이다. 이후의 연구에서 한번의 진동주기에 Lagrangian 개념에서 벽근처의 유체 덩어리가 내부 영역으로 침투해 들어가는 길이 l^* 를 침투길이(penetration length)라 부르겠다. 당연히 침투길이는 A^* 와 f^* 에 매우의

존적일 것이다.

차원해석을 통해

$$\Gamma^* \propto A^*/f^* \quad (8)$$

임을 쉽게 알 수 있다. 따라서 침투길이(Γ^*)와 용기반경(L^*)의 비에 따라서 정성적으로 다른 특성을 갖는 다음 4가지 경우의 유동을 예상할 수 있다.

- (1) $\Gamma^* \ll O(L^*)$ (1-열섬모드),
- (2) $\Gamma^* < O(L^*)$ (2-열섬모드),
- (3) $\Gamma^* \sim O(L^*)$ (4-열섬모드),
- (4) $\Gamma^* > O(L^*)$ (비대칭모드).

이상의 추론은 파라미터 변화에 따라 나타나는 일반적인 현상으로 Fig.3의 regime diagram 과 다음 절의 수치계산 결과를 통해 확인할 수 있다. 그리고 각 영역에 대한 모드이름은 과도상태에서의 등온선의 모습으로부터 저자가 붙인 이름이다. 등온선을 지형을 나타내는 등고선에 비유해서 온도피크가 나타나는 지형을 열섬(thermal island)로 부르기로 했다.

요약하면 침투길이가 용기반경에 비해 매우 작은 경우, 즉 $\Gamma^* \ll O(L^*)$ 인 경우 (이 경우는 물리적으로 외부의 가진이 매우 약한 경우 $A^*/f^* \ll O(L^*)$ 를 의미한다) 온도피크(temperature peak)가 가운데 하나가 나타난다. 외부 가진 세기를 점점 키워 침투길이가 용기반경에 비해 작지만 유한한 크기를 가지는 경우, 즉 $\Gamma^* < O(L^*)$ 인 경우가 되면 온도피크가 시간이 지남에 따라 수평축을 기준으로 위, 아래 두 개 나타난다. 반면 더욱 가진의 세기가 커져 $A^*/f^* \sim O(L^*)$, 즉 침투길이가 용기의 반경 정도의 크기를 가지게 되면 진동주기동안 발생하는 4개의 선회유동의 세기가 모두 비슷해져 (Fig.3 참조), 1, 2, 3, 4 사분면에 하나의 온도피크가 나타나 4개의 대칭성을 갖는 열섬형태를 보인다. 그리고 가진의 세기가 $A^*/f^* > O(L^*)$ 정도로 커지게 되면 좌우 선회유동이 대칭축부근에서 강하게 충돌하여 대칭성이 깨어지면서 무질서하게 운동하는 비대칭모드로 발전하게 된다. 이상의 물리적 메카니즘은 다음 절의 수치계산 결과로부터 쉽게 확인할 수 있다.

4.2 모드해석

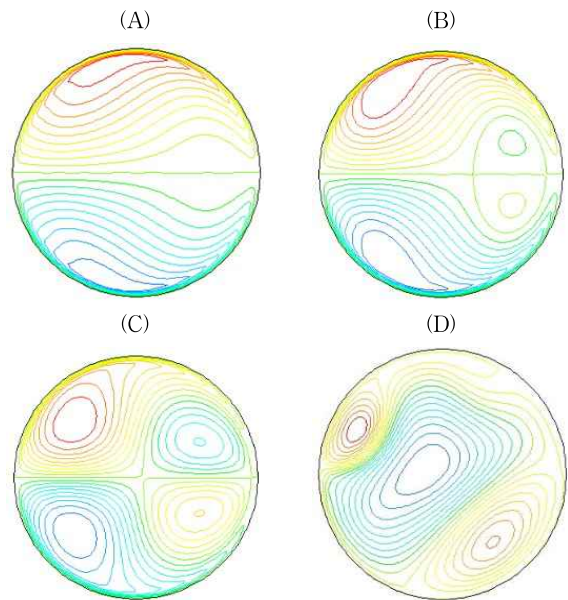
이후는 계산결과 얻어진 4개의 영역[Fig.3 참조]에 대한 전형적인 유동장 및 온도장의 모습을 특정계산결과를 통해 요약했다.

4.2.1 유동장

유동장의 모습은 일반적으로 외한 모든 모드에서 초기의 과도상태가 존재하고 짧은 시간의 과도상태(진동주기로 10 주기이내)가 지나면 (시간평균 개념으로) 거의 준정상상태에 도달한다. 따라서 여기에서는 각 모드에 대한 준정상상태의 특징적인 패턴의 모습을 논의한다.

4.2.1.1. 1-, 2-, 4-열섬모드의 유동특성

1-, 2-, 4-열섬모드에서 발생하는 유동장의 특징은 여러 진동주기를 거치면서 발달한 좌우 선회유동의 크기에서 볼 수 있다. Fig.4(A), (B), (C)는 각각 전형적인 1-열섬모드, 2-열섬모드, 4-열섬모드에서의 유동모습이다. 그림에서 확연히 볼 수 있듯이 (1-열섬모드)→(2-열섬모드)→(4-열섬모드)로 변화하면서 좌우의 선회유동의 세기가 비슷해져 감을 알 수 있다. A^*/f^* 값이 매우 작은 경우($\Gamma^* [= A^*/f^*] \ll O(L^*)$)에는 선회유동의 세기가 작게 된다. 결과적으로 진동의 방향이 바뀔 때 나타나는 이전주기의 운동에 의한 관성력도 작다. 따라서 진동의 방향이 바뀌면서 이전 주기의 선회운동은 점성력에 의해 급격히 소멸되고 현주기의 선회운동만 살아남게 되어 Fig.4(A)에서와 같은 유동모습을 보이게 된다. 한편 A^*/f^* 값이 4-열섬모드를 일으킬 수 있을 만큼 커지게 되면($\Gamma^* [= A^*/f^*] \sim O(L^*)$), 이전주기의 관성력이 점성력을 압도하게 되고 이것이 진동방향이 바뀌더라도 이전주기의 선회운동을 유지시키게 된다. 결



(A) $(A^* = 0.1(m/s), f^* = 5(1/s))$; (B) 2 thermal-islands mode ($A^* = 0.2(m/s), f^* = 5(1/s)$); (C) 4 thermal-islands mode ($A^* = 0.5(m/s), f^* = 5(1/s)$) (D) asymmetric mode ($A^* = 0.83(m/s), f^* = 3.3(1/s)$).

Fig. 4 Pattern of stream lines, at $t^* = 5.6s$, for the cases of (A) 1 thermal-island mode

과적으로 비슷한 세기의 이전주기의 선회운동과 현주기의 선회운동이 충돌하면서 공존하게 되어 Fig.4(C)에서 볼 수 있는 것과 같은 유동모습 (유체가 x^* -방향으로 유입되고 y^* -방향으로 유출되는 streaming flow 모습)을 보이게 된다.

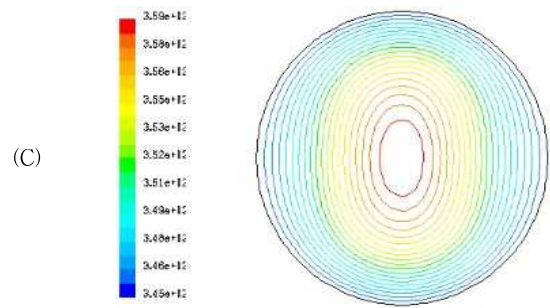
4.2.1.2. 비대칭모드의 유동특성

A^*/f^* 의 값이 매우 커져 $\Gamma^*[\equiv A^*/f^*] > O(L^*)$ 이 되면, 대칭축에서의 좌우 선회운동의 충돌강도가 유동 불안정성을 유발시켜 더 이상 x^* -축을 기준으로 한 상하패턴의 유동을 유지할 수 없게 된다. 따라서 이 경우 시간에 따라 매우 복잡한 유동양상을 보이게 된다. Fig.4(D)는 특정시간($t^* = 5.6s$)에서의 3개의 선회운동 (작은 2개의 선회운동과 반대로 회전하는 큰 하나의 선회운동) 모습을 보여 주고 있다. 시간이 지나감에 따라 3개의 선회운동은 대칭축을 중심으로 공전, 자전 및 상호합침 (mutual merging) 등의 다양하고 불규칙적인 유동모습을 보인다. 이 유동은 미세한 교란에 대한 불안정성이 나타나는 층류에서 난류로의 천이영역이 시작되기 직전의 유동모습으로 판단된다.

4.2.2 온도장

4.2.2.1. 1-열섬모드

A^*/f^* 의 값이 가장 작은 경우에 발생하는 1-열섬모드에서의 시간에 따른 온도장의 변화 모습이 Fig.5에 나와 있다. 이 경우 전도효과와 비슷한 크기의 (진동축을 따라 일어나는) 대류효과 때문에 대류효과가 거의 없는 수직축(y^* -축) 방향에 비해 수평(x^* -축) 방향으로 열전달이 보다 빠르게 일어난다. 결과적으로 y^* -축 방향으로 주축을 가진 타원 모



field when $A^* = 0.1(m/s)$ and $f^* = 4(1/s)$. Times, t^* , are (A)2.8s, (B)8.4s, (C)14s.

Fig. 5 Plots of time evolutionary temperature

양의 등온선이 나타난다.

4.2.2.2. 2-열섬모드

A^*/f^* 의 값이 1-열섬모드보다 더욱 커지면 수평 x^* -축 방향의 대류효과가 전도효과를 압도하게 되고 결과적으로 대류효과가 가장 큰 x^* -축 부근의 온도장이 가장 빨리 정상상태로 접근하게 된다 [Fig.6(A)-(C)]. 따라서 시간이 지나

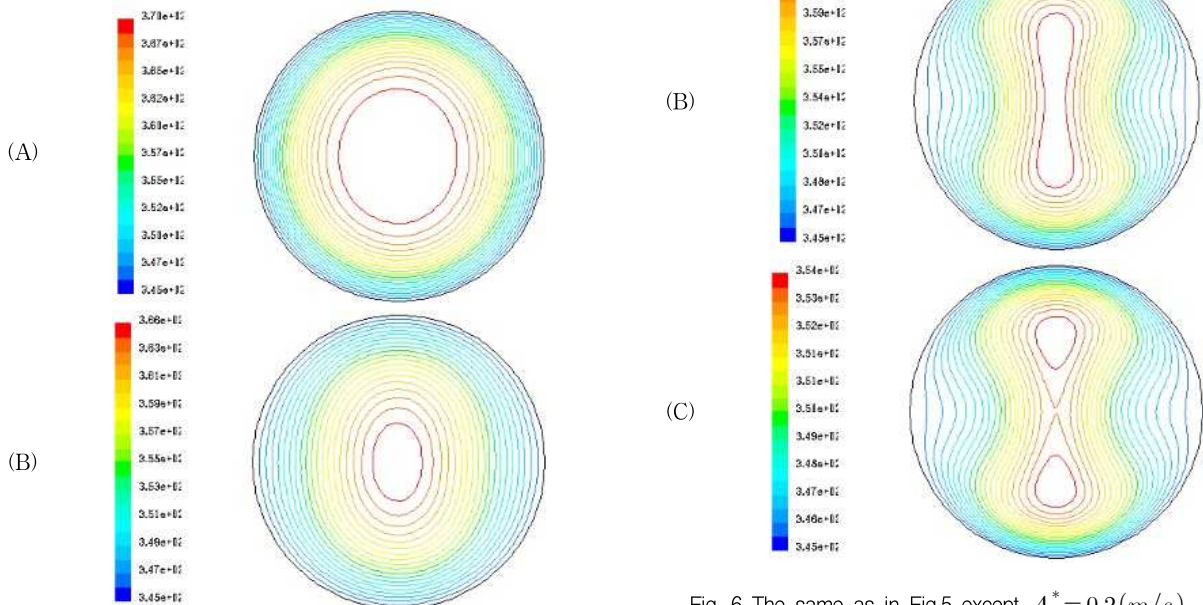


Fig. 6 The same as in Fig.5 except $A^* = 0.2(m/s)$.

면 Fig.6(C)에서처럼 x^* -축을 중심으로 상하 대칭인 두개의 열점이 나타난다. 이 경우 온도변화 특징은 초기에는 중심부 근에서 차가운 벽 부근에서 유입되는 차가운 유체에 의해 급격한 cool down이 일어나고 시간이 지나면서 2개의 열점이 나타난다. 이후 2개의 열점부근에서는 대류효과와 전도효과가 동시에 작용하는 열전달 프로세스에 의해 정상상태로 접근한다.

4.2.2.3. 4-열점모드

Fig.7은 전형적인 4-열점모드에 대한 온도장의 시간변화를 나타낸다. 2-열점모드에 비해 더욱 큰 A^*/f^* 값의 주기적인 섭동이 가해지면 침투길이(r^*)가 실린더 반경(L^*)에 도달하게 되고, 이때 주기적으로 좌우의 수평방향에서 들어오는 차가운 유체를 담은 흐름이 중심점 부근에서 충돌한 후 대류의 방향이 수직방향(y^* -축 방향)을 따라 흐르면서 Fig.7 모에서 볼 수 있는 것 같은 4개의 열점을 만들게 된다. 4-열점모드에서의 초기상태 온도모습[Fig.7(A)]은 4개의 열점이 만들어지기 이전이기 때문에 2-열점모드와 같다. 그러나 4개의 열점이 만들어 지면서 내부영역의 모습은 급격히 온도장이 거의 일정한 모습으로 바뀌어 가는 것을 볼 수 있

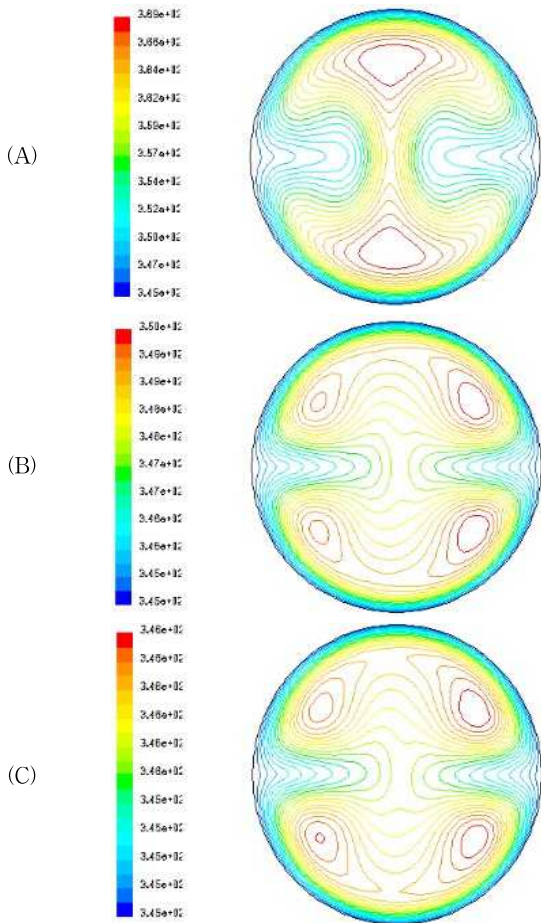


Fig. 7 The same as in Fig.5 except $A^* = 0.4(m/s)$.

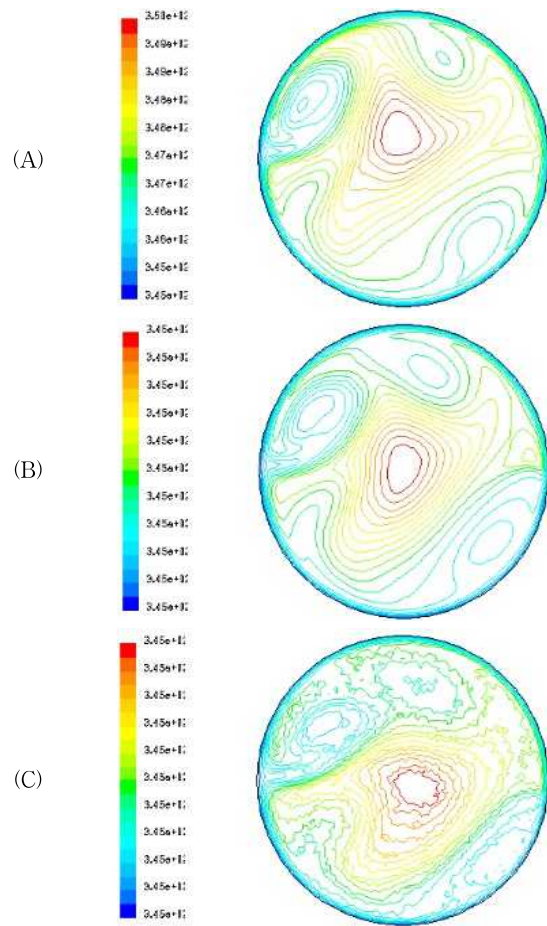


Fig. 8 The same as in Fig.5 except $A^* = 4(m/s)$.

다. 이것은 4-열점모드에서는 열전달이 주로 대류에 의해 일어난다는 것을 의미한다.

4.2.2.4. 비대칭모드

A^*/f^* 의 값이 더욱 커져서 침투길이(r^*)가 실린더 반경(L^*)와 비교해서 $r^* > O(L^*)$ 이 되면 수평축(x^* -축)을 따르는 좌우의 유동이 더 이상 상하 대칭성을 유지하기 힘들만큼 대칭축에서 강한 충돌이 일어나고 이로 인한 유동 불안정성이 나타나서 Fig.8에서처럼 대칭성이 깨어지는 온도장이 나타나게 된다. 이 경우 내부 영역의 상당 부분은 차가운 벽 근처에서 냉각된 경계층 유동이 내부를 관통하는 강한 대류효과에 의해 매우 빠른 시간에 정상상태의 온도분포로 접근한다. 이후 내부에 시간에 따라 진동하는 주름진 등온선을 갖는 큰 하나의 열점을 만들어 (등온선의 표면적 증가에 따른) 전열면적 증대효과를 극대화 시키면서 내부 온도를 급격히 떨어뜨리는 프로세스가 진행된다 [Fig.8(A)-(C)].

5. 결 론

(1) 주기적 진동을 동반한 실린더 내부의 Cool-Down 유동 및 열전달 특성에 대한 이론정립을 했다.

(2) 수치해석을 통해 여러 케이스에 대한 열전달 특성을 비교 분석하고 이를 바탕으로 열전달 특성이 4가지 모드로 나누어짐을 밝혔다.

(3) 4가지모드(1-열섬모드, 2-열섬모드, 4-열섬모드, 비대칭모드)에서 일어나는 열전달 메카니즘을 규명했다.

(4) 열전달모드 결정이 용기의 반경(L^*) 과 침투길이 ($L^* \equiv A^* f^*$)의 비에 의해 결정된다는 것을 보였다. 즉, 1-열섬모드, 2-열섬모드, 4-열섬모드, 비대칭모드가 각각 다음의 무차원수 값 $A^* f^*/L^* \ll 1$, $A^* f^*/L^* < 1$, $A^* f^*/L^* \sim 1$, $A^* f^*/L^* > 1$ 에 대응된다.

(5) 열전달의 효과는 외부에서 가하는 가진의 강도가 커질 수록 강하게 나타난다. 즉, 1-열섬모드 < 2-열섬모드 < 4-열섬모드 < 비대칭모드 이다. 그러나 가진을 위해 투입되어야 할 에너지도 동시에 증가한다. 따라서 에너지 효율을 고려한 최적의 운전조건을 고려할 때는 regime diagram에서 모드변화가 일어나는 경계선상 부근의 작동점을 주목할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2009년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0077233)

참고문헌

(1) Walin, G., 1971, "Contained non-homogeneous flow under gravity or how to stratify a fluid in the laboratory," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 48, pp. 647~672.

(2) Sakurai, T. and Matsuda, T., 1972, "A temperature adjustment process in a Boussinesq fluid via a buoyancy-induced meridional circulation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 54, pp. 417~421.

(3) Jischke, M.C. and Doty, R.T., 1975, "Linearized buoyant motion in a closed container," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 71, pp. 729~754.

(4) Ivanova, A.A. and Kozlov, V.G., 1988, "Vibrationally gravitational convection in a horizontal cylindrical layer," *Heat Transfer-Soviet Research*, Vol. 20, No. 2, pp. 235~247.

(5) Fu, W.F. and Shieh, W.J., 1992, "A study of thermal convection in an enclosure induced simultaneously by gravity and vibration," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 7, pp. 1695~1710.

(6) Hyun, J.M., 1994, "Unsteady buoyant convection in an enclosure," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 24, pp. 277~320.

(7) Amin, N., 1988, "The effect of g-gitter on heat transfer," *Proceedings of Royal Society in London*, Vol. A419, pp.151~172.

(8) Antohe, B.V. & Lage, J.L., 1997, "The prandtl number effect on the optimum heating frequency of an enclosure filled with fluid or with a saturated porous medium," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40(6), pp. 1313~1323.

(9) Park, J.S. & Hyun, J.M., 2002, "Transient motion of a confined stratified fluid induced simultaneously by sidewall thermal loading and vertical throughflow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.451, 295~317.

(10) Fluent Manuals.