

# 비정상 자연대류의 수치 계산

## Numerical Simulations of Unsteady Natural Convection

곽호상<sup>1)</sup>, ○ 현재민<sup>2)</sup>

Ho Sang Kwak and Jae Min Hyun

Unsteady natural convection of an enclosed fluid has been one of the fundamental thermo-fluid problems, of which dynamic relevance is found in many engineering applications. Together with the inherent coupling between the boundary layers and the interior core, and strong interaction between flow and temperature fields, the unsteadiness poses serious hurdles for analytical and experimental approaches. With the recent development of computers and solution algorithms, computational fluid dynamics has become the prevailing tool to tackle the underlying problems. In this presentation, a few examples of numerical studies are introduced. The usefulness and potential of numerical simulations in investigating unsteady natural convection are elaborated.

### 1. 서론

밀폐공간에서의 자연대류는 금속/비금속 재료의 정제, 전자 및 기계장비의 냉각, 공기조화 등 공학적인 문제에서부터 해양, 대기과 같은 대규모 유체계의 환경 문제에 이르기까지 광범위한 응용분야에서 연구되는 주제로 특히 최근 들어 비정상 거동에 대한 관심이 고조되고 있다 [1-3]. 이러한 관심은 실제 대부분의 자연대류는 비정상성이 기본 특성인 난류 현상임을 차치하더라도 냉각설비의 시동 및 정지, 최적 운전을 위한 시스템의 동적 제어, 태양열과 같은 외부 조건의 변화, 임의의 초기 상태에서 특정 조건까지의 가열 또는 냉각 등 비정상 거동의 이해가 필수적인 문제에 대한 연구의 필요성에서 기인한 것이다. 그러나 비정상 자연대류의 중요성에 비추어 기존 연구의 대부분은 정상상태의 문제를 다루고 있다.

일반적으로 공학적 관심의 대상이 되는 것은 전도보다는 부력에 의한 비선형 대류효과가 지배적인 레일리(Rayleigh)수가 1보다 매우 큰 경우이다. 이 경우, 온도장과 유동장은 벽면에 형성되는 경계층과 점성 및 전도의 영향이 상대적으로 미미한 내부영역(interior core)으로 나누어진다. 유동장과 온도장, 그리고 경계층과 내부 영역의 강한 결합(coupling)에 의한 물리적 상호작용은 자연대류 해석을 어렵게 하는 요소이다. 여기에 문제의 비정상성이 유발하는 추가적인 해석상의 어려움은 지금까지 비정상 자연대류에 대한 연구가 상대적으로 미진했던 주 요인으로 작용하였다.

Ostrach는 그의 정리문헌[1]에서 자연대류 해석에 있어 규모해석(scaling analysis)과 실험의 중요성과 강조하고 수치 계산의 문제점을 제기한 바 있다. 현상의 물리적 복잡성과 다양성, 그리고 이를 일반적으로 묘사하지 못하는 수치 모델의 한계가 주요 논거였다. 그러나, 근년에 이루어진 컴퓨터와 수치 알고리즘의 급속한 발전은 우리에게 비정상 자연대류 해석의 새로운 가능성을 보여주고 있다.

자연대류의 연구의 일반적인 목적은 지배적인 시간, 유속 및 길이의 규모와 열전달율의 예측이다. 이러한 물리량들의 시간에 따른 변화가 관심의 대상인 비정상 문제의 경우에는 열유동장의 전개 및 발달 과정에 대한 이해가 핵심적인 요소이며 국소적 또는 시간 평균적 정보뿐만 아니라 전체 유동장 및 온도장의 시간에 따른 동적 구조에 대한 정보가 필수적이다. 따라서 비정상 열유속, 온도장, 유동장의 동시 측정 및 가시화가 요구되는데 측정 및 가시화 기법의 발전에도 불구하고 실험적 방법이 제공할 수 있는 정보에는 한계가 있다. 원하는 비정상 문제의 초기 및 경계조건의 실험적 구현이 불가능하거나 매우 어려운 경우도 적지 않다.

이러한 고려는 비정상 자연대류의 연구에 있어서 수치적 방법의 중요성을 강조하고 있다. 수치

1) 시스템공학연구소 슈퍼컴퓨터센터 (305-333, 대전광역시 유성구 어은동 1, Tel: 042-869-0546)

2) 한국과학기술원 기계공학과 (305-701, 대전광역시 유성구 구성동 373-1, Tel: 042-869-3012)

계산의 장점은 무엇보다 시간에 따른 전체 유동장의 정보를 모두 제공해 준다는 것이다. 적절한 후처리 기법을 이용하면 해석적, 실험적 방법으로부터 얻기 어려운 유용한 정보를 가공하거나 가시화할 수 있기 때문에 연구자의 물리적 해석 능력을 향상된다. 또한 수치계산에서는 복잡한 기하학적 형상, 초기 및 경계조건도 수치적인 모델링이 가능하다. 실험으로 구현하기 어렵거나 개념적으로 새로운 문제에 수치적 접근의 유용성은 이러한 특성에서 비롯된다.

이 논문에서는 주기적인 외부 조건의 변화에 의한 자연대류와 밀도역전 현상을 가지는 유체의 최대 밀도점을 통과하는 냉각이라는 두 가지 문제에 대한 수치 연구 사례의 소개를 통해 비정상 자연대류 연구에 있어서의 수치 계산의 유용성을 조명하고 그 필요성을 강조하고자 한다.

## 2. 주기적 외부 조건의 변화에 의한 비정상 자연대류

최근 주기적으로 변화하는 외부 조건에 의해 발생하는 비정상 자연대류에 대한 관심이 높아지고 있다 [4-12]. 점멸 제어로 운전되는 냉각장치, 하루 주기로 변화하는 태양열의 영향하에 있는 유체 저장고의 예와 같이 실제 응용에서 자주 등장하는 주기적 외부조건이 관심의 배경을 이루고 있다. 또 다른 관점에서 이러한 문제의 물리적 중요성을 찾을 수 있는데 바로 공진(resonance)의 가능성이다. 공진은 어떤 시스템의 고유진동수와 같은 주파수의 가진이 주어지는 경우 시스템의 진동 진폭이 극대화되는 역학적 현상으로 열유체 시스템의 경우에도 고유의 특성주파수가 존재한다면 발생 가능한 현상이다.

열유체 시스템의 경우 이러한 연구가 요구하는 다양한 진폭과 주파수의 주기적 온도 또는 열유속 조건을 실험적으로 구현하고 조절하는 것이 용이한 작업이 아니다. 실험 조건의 구현이 가능하다 할지라도 현상 분석에 필수적인 시간에 따른 열전달율 측정과 열유동장의 가시화를 동시에 이루는 것도 매우 어려운 일이다. 이런 이유로 지금까지의 연구는 주로 수치 계산에 의한 가상실험 방법을 택하고 있다.

밀폐공간의 자연대류에 있어서 공진의 존재를 처음 밝힌 것은 Lage와 Bejan[4]의 수치 연구이다. 한 수직벽에 주기적인 사각파(square wave)형 열유속 조건이 주어지는 사각 공간 모델을 이용하여, 용기의 중심 수직 단면에서의 Nusselt수의 변동 진폭이 특정 주파수에서 극대화됨을 발견하였고 이를 자연대류의 공진으로 정의하였다. Kwak과 Hyun[5]은 계산 모델의 벤치마크 시험 모형으로 사용되는 고온 및 저온 측벽과 단열된 수평벽을 갖는 측벽가열형 사각용기 [14]에서 고온 벽의 온도가 주기적으로 변화하는 경우에 대한 수치 연구를 통해 Fig. 1에서 볼 수 있는 것과 같이 특정주파수에서 자연대류의 공진이 발생함을 확인하였다. 이 밖에도 진동과 같은 기계적 형태의 주기적 외부 자극에 의해 유발되는 열대류의 공진[6-8] 및 다공성 물질에서의 자연대류 공진[9-10] 또한 보고되고 있다.

공진현상의 존재는 두 가지 측면에서 공학적인 고려를 제안하고 있다. 심한 열유속 변동이 바람직하지 않은 결정성장이나 공기조화 같은 경우, 공진 발생의 역제가 관건이 될 것이다. 반면에 공진이라는 물리적 현상의 효과적 이용이라는 측면의 접근 또한 가능하다. Fu와 Shieh[7]는 측벽가열형 용기 내에서 측벽 온도의 진동을 이용하여 균일 온도의 초기조건으로부터 정상상태까지 도달하는 시간을 단축시킬 수 있음을 검증하였고, Iwatsu 등[6]은 벽면의 진동을 이용한 공진발생으

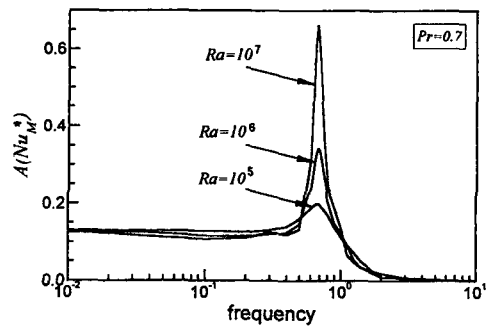


Fig. 1 Variations of the normalized amplitude of fluctuation of the Nusselt number at the vertical center plane with frequency.  $Pr=0.7$ , forcing amplitude=0.1ΔT.

로 자연대류 열전달 향상 가능성을 보여주었다. Antohe와 Lage[11], Kwak 등[12]은 자연대류 공진을 이용하여 열전달율의 시간에 따른 변동의 진폭뿐이 아니라 평균값도 향상시킬 수 있음을 지적하였다.

공진의 부정적 측면 극복과 긍정적 측면의 이용이라는 두 가지 시도에 있어 공히 핵심적인 과제는 자연대류 시스템에서 공진을 발생시키는 고유진동 모드가 무엇이며 그 주파수가 얼마인가 규명하는 것이다. 특히 공진은 특정 주파수 대역에서 선택적으로 발생하는 현상이므로 공진주파수의 정확한 예측이 필수적이다. 그러나 비교적 고유진동 모드가 잘 정의되어 있고 고유진동수를 찾는 해석적 실험적 방법이 잘 정비된 고체계와는 달리 유체계에서 공진주파수를 찾는 것은 쉽지 않은 일이며 내부 열유동장의 과도거동 특성에 대한 이해가 뒷받침되어야 한다.

Lage와 Bejan[4]은 수치계산과 함께 고유진동수를 예측하기 위한 규모해석(scaling analysis)을 수행하였다. 기본적인 아이디어는 측벽에서의 열유속의 변화의 영향이 용기내부를 한 바퀴 순환하는데 필요한 시간에 해당하는 주파수를 공진주파수라고 상정한 순환 이론이었다. 나아가 이 문제에서 대부분의 유동은 경계층에서 이루어진다는 사실 인식에 입각하여 경계층에서의 속도와 용기의 크기를 이용 유체의 용기내부 순환 시간을 구하고 이를 기준으로 주파수를 예측하였다. Antohe와 Lage[9-10]는 이를 계승하여 다공성 물질의 경우에 적용 가능한 일반화를 시도하였다. 그러나 이 방법은 수치실험과 상당한 편차를 가지는 결과를 생산하였다.

주기적 온도조건이 주어지는 측벽가열형 문제에 대한 수치계산을 수행한 Kwak과 Hyun[5]의 경우에는 규모해석 대신에 계산결과의 후처리와 가시화에 기반한 분석을 통해 공진주파수 규명을 시도하였다. 먼저 열유동장의 진동 특성을 파악하기 위해 열유동장의 시간평균치를 제외하고 시간에 따른 주기적인 변화 부분을 동영상화하여 관찰하였다. 그 결과 새로운 주기에서의 측벽온도 증가(감소)의 영향이 용기를 한 바퀴 순환하여 돌아온 이전 주기에서의 측벽온도의 증가(감소)의 영향과 동기화되어 결합할 때 공진이 발생함을 발견하였다. Lage와 Bejan[4]이 제시한 용기내부 순환론에 근거한 공진주파수 예측법의 물리적 타당함을 확인한 것이다.

문제는 측벽온도 변화의 영향이 어떤 기구에 의해 용기 내부를 순환하는가 하는 점이다. Lage와 Bejan[4]의 경우는 경계층내부의 유동에 의한 대류를 그 수송기구로 판단한 것이다. 이번에는 전체 유동장 및 유동장의 시간에 따른 변화를 동영상화하여 관찰하였는데 공진 발생시 유동의 진동이 활성화된 영역은 경계층이 아니라 내부영역이었다. 온도장의 경우에도 Fig. 2에서 보여진 것처럼 경계층 구조의 변화는 거의 없었고 내부 영역에서 주기적인 등온선의 좌우 요동이 관찰되었다. 등온선(등밀도선)은 요동이 발생하면 내부 영역의 유체는 마치 시간에 따라 중력방향이 변하는 것과 같은 환경을 경험하게 된다. 이러한 결과는 공진은 경계층이 아닌 내부영역과 관련된 현상이며 구체적으로는 측벽에서의 온도 변화의 영향은 성층화된 내부 영역에서의 내부중력파(internal gravity wave)를 타고 파급된 뒬을 의미하는 것이다.

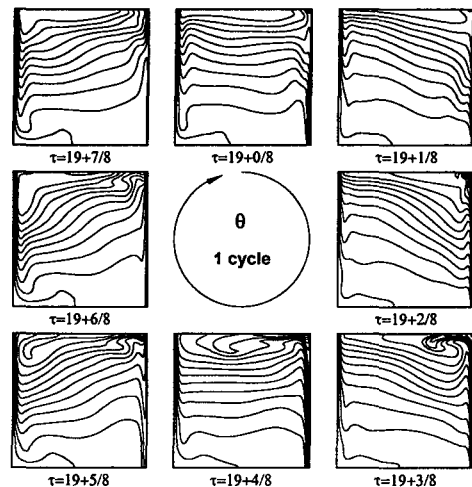


Fig. 2 Sequential contour plots showing the periodic temperature fields in a cycle (resonance case).  $Ra=107$ ,  $Pr=0.7$ , forcing amplitude= $\Delta T$ .

이러한 발견에 기초하여 Kwak와 Hyun[5]은 내부중력파의 근거한 공진주파수 예측을 수행하였고 Fig. 3에서 알 수 있듯이 수치 실험과 잘 일치하는 결과를 얻었다. Kwak 등[5,12-13]은 이러한 성과에 기반하여 주파수 변화에 따른 다량의 수치실험 없이 외부조건의 변화가 없는 경우의 기본 상태에 대한 수치계산의 결과로부터 공진주파수를 예측하는 방법을 제안하였다. 자연대류 과정의 물리적 상사성이 있는 Lage와 Bejan[4]의 모델과 Fu와 Shieh의 모델에 이 방법을 적용시켜 기존의 방법보다 향상된 예측을 얻을 수 있었다. 이러한 연구는 실험적으로 구현이 상대적으로 어렵거나 개념적으로 새로운 문제의 해결에 있어 수치계산의 유용성과 비정상 자연대류 문제에 있어 수치계산 결과의 적절한 후처리 및 분석의 중요성 및 필요성을 보여주는 좋은 사례가 될 것이다.

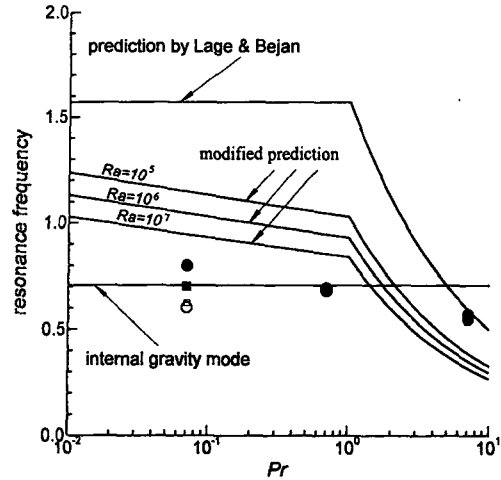


Fig. 3 Prediction of resonance frequency. The curves indicate the predicted values and the symbols represent the values acquired by numerical experiments by Kwak and Hyun [5].

### 3. 최대밀도점을 지나는 액체의 냉각

밀폐된 용기 내에서 일정 초기 온도를 가진 액체를 빙점 근처의 온도까지 냉각하는 문제는 음료제조 공정에서 흔히 발생하는 비정상 열전달 문제이다. 냉각시간의 평가와 최적 냉각조건의 탐색이 연구의 초점이 되는데 이를 위해서는 냉각과정에서 일어나는 온도장 및 유동장의 전개과정과 이와 결부된 열전달 기구의 변화에 대한 이해가 필수적이다.

대부분의 자연대류에 의한 액체 냉각 문제의 경우, 밀도와 온도의 선형관계를 전제한 Boussinesq 가정이 사용되고 있다. 그런데 적지 않은 액체의 경우, 결빙점 근처의 특정온도에서 밀도의 최대값이 나타난다. 대표적인 예가 물로서 3.98°C에서 최대 밀도를 가지며 이 온도로부터 멀어 질수록 밀도가 감소한다. 냉각과정에 유체가 최대밀도점을 지나는 경우, 밀도역전(density inversion)의 발생은 밀도차에 의해 구동되는 자연대류 과정 전체에 영향을 주어 Boussinesq 유체의 경우와는 다른 결과를 초래하게 된다 [15-16].

이러한 문제의 경우 열유동장의 가시화와 열전달율의 측정이 동시에 필요한데, 어떠한 형태의 비정상 거동이 일어날 것인가 미리 예측하기 어려운 상태에서 처음부터 실험적 방법을 동원하는 것보다는 먼저 수치적 계산을 통해 정성적 분석을 수행하는 것이 효율적인 접근방법이 될 것이다.

Kwak 등[17]은 원통형 용기내의 액체를 벽 냉각을 통해 초기 최대밀도점 이상의 온도로부터 최대 밀도점 이하로 냉각하는 문제에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4는 벽면 Nusselt수의 시간에 따른 변화 추이를 도시한 것으로 전체 냉각과정은 4 단계로

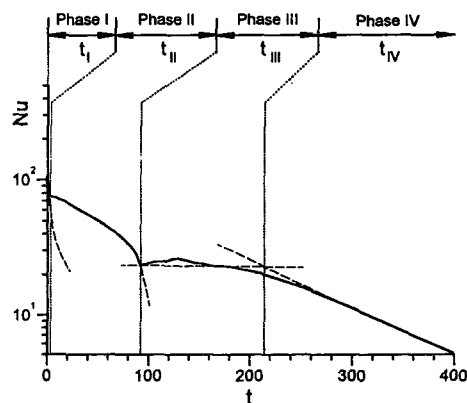


Fig. 4 Evolution of the Nusselt number.

구분됨을 확인할 수 있다. 첫 번째 단계는 냉각 초기의 짧은 시간에 이루어지는 측벽 경계층이 형성 과정이다. 세 번째는 측벽에서 냉각되어 최대밀도 보다 가벼워진 유체가 벽면을 따라 상승하여 수평 방향으로 혼입되고 내부영역의 성층화가 이루어지는 과정으로 측벽 경계층의 구조변화가 거의 없어 열전달율은 거의 일정하다. 네 번째 단계는 냉각이 계속되면서 내부유체의 평균 온도가 하강하고 이에 따른 유효 레일리(Rayleigh)수의 감소로 열전달율이 감소하는 정상상태로의 마지막 접근 과정이다. 이 세 가지 단계의 냉각거동은 Boussinesq 유체의 냉각에 대한 연구 결과로부터 유추 가능한 것이다. 남은 과정은 기존의 연구 결과로부터 설명되지 않는 두 번째 단계의 본질의 규명이다.

이를 위해 Fig. 5에 예시한 것과 같이 1-2 단계에서의 열유동장의 변화를 관찰하였고 경계층 재구조화(boundary layer restructuring)라는 새로운 과도현상을 발견하였다. 초기에 냉각에 의해 측벽경계층이 형성되고 아래 방향의 유동이 발생한다. 이에 따라 최대 밀도값의 온도를 가진 유체가 밑 부분에 축적되어 장애물 역할을 하게 되면서 경계층 내에서는 발생한 위쪽 방향의 부력이 상향류를 구동하여 경계층 내부에 갇혀진 유동 셀이 만들어진다. 이 유동 셀은 벽면에서의 냉각에 의해 위쪽으로 성장하면서 전체 측벽 경계층이 시간에 따라 재구조화 된다. 새롭게 성장하는 부분의 열전달율이 그 위쪽보다 상대적으로 작으므로 성장과 함께 벽면 열전달율이 감소하는데 이것이 Fig. 4에 두 번째 단계의 Nusselt 수의 변화를 설명하고 있다.

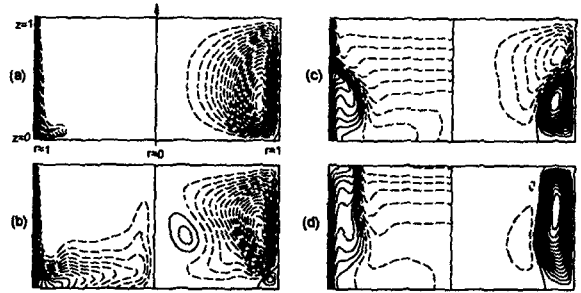


Fig. 5 Sequential plots showing isotherms (left column) and flow patterns (right column) in the phases I and II. The broken lines indicate counterclockwise circulation and temperatures greater than the maximum density temperature.

냉각이 진행됨에 따라 유체의 평균온도가 최대밀도점을 통과하기 때문에 온도역전의 영향은 밀도역전의 영향은 2단계까지 주로 나타나며 후반부의 과정은 최대 밀도점부터의 단조적 냉각과정으로 이해할 수 있다. 이러한 관찰에 근거하여 전체 냉각과정을 표현하는 두 개의 의미 있는 무차원수를 제안하고 이에 근거한 냉각시간 평가를 수행하고 수치실험을 검증하였다. 이 연구는 물리적 현상 사전 예측이 어려운 새로운 문제를 접근하는데 있어서 수치계산의 유용성을 보여주는 예가 될 것이다.

#### 4. 결론

지금까지 두 가지 비정상 자연대류 문제에 대한 수치계산 연구 사례를 살펴보았다. 경계조건의 구현, 열유동장의 동시적 가시화 및 열전달율 등 의미 있는 정보의 분석에 있어서 실험적 접근이 한계를 가지는 문제나 기존의 지식 축적이 미진한 새로운 형태의 문제에 접근함에 있어서 수치계산의 유용성을 지적하였다.

이 논문의 의도는 전통적인 해석적 방법이나 실험적 방법의 유의미성을 과도평가 하거나 부정하자는 것은 아니다. 정량적인 결과를 요구하는 많은 실제 자연대류 문제에 있어 수치적인 해의 신뢰성에 대한 의문이 존재하고 수치 연구의 결과를 검증하기 위한 실험이 요구되는 것이 사실이다. 보다 실제 현실에 가까이 접근할 수 있는 물리적 모델과 수치 알고리즘의 개발을 위한 노력의 중요성과 필요성은 강조해도 지나치지 않을 것이다. 또 한 가지 지적하고 싶은 점은 수치계산은 그 자체로 완결적인 것은 아니라는 것이다. 적절한 후처리와 물리적 해석이 뒷받침 될 때 수치계산은 비로소 해석 도구로서의 위치를 확보하게 된다.

이제 비정상 거동에 대한 자연대류의 해석에 있어 특히 정성적 거동 분석에 있어 유용한 초기

해석 도구로서 자리잡고 있다. 그러나 실제적인 문제에 접근 가능한 보다 실용적인 도구로 발전하기 위해서는 다양한 문제에 대한 수치 연구 성과의 축적이 필요하다. 비정상 자연대류에 대한 수치연구의 활성화를 기대해 본다.

### 참고문헌

- [1] Ostrach, S., "Natural Convection in Enclosures," *J. Heat Transfer* **110** (1988), p.1175.
- [2] Hyun, J. M., "Unsteady Buoyant Convection in an Enclosure," *Adv. Heat Transfer* **24** (1994), p. 277.
- [3] Fusegi, T. and Hyun, J. M., "Laminar and Transitional Natural Convection in an Enclosure with Complex and Realistic Conditions," *Int. J. Heat Fluid Flow* **15** (1994), p.258.
- [4] Lage, J. L. and Bejan, A., "The Resonance of Natural Convection in an Enclosure Heated Periodically from the Side," *Int. J. Heat Mass Transfer* **26** (1993), p.2027.
- [5] Kwak, H. S. and Hyun, J. M., "Natural Convection in an Enclosure Having a Vertical Sidewall with Time-Varying Temperature," *J. Fluid Mech.* **329** (1996), p.65.
- [6] Iwatsu, R., Hyun, J. M., and Kuwahara, K., "Convection in a Differentially-Heated Square Cavity with Torsionally-Oscillating Lid," *Int. J. Heat Mass Transfer* **35** (1992), p.1069.
- [7] Fu, W. S. and Shieh, W. J., "Transient Thermal Convection in an Enclosure Induced Simultaneously by Gravity and Vibration," *Int. J. Heat Mass Transfer* **36** (1993), p.437.
- [8] Kwak, H. S. and Kuwahara, K., "Thermal Convection of an Enclosed Fluid Responding to Time-Periodic External Excitations: Effects of g-Jitters and Wall Temperature Oscillations," *ISAS Report No. 668* (1997).
- [9] Antohe, B. V. and Lage, J. L., "A Dynamic Insulator: Inducing Resonance with a Fluid Saturated Porous Medium Enclosure Heated Periodically from the Side," *Int. J. Heat Mass Transfer* **37** (1994), p.771.
- [10] Antohe, B. V. and Lage, J. L., "Amplitude Effect on Convection Induced by Time-Periodic Horizontal Heating," *Int. J. Heat Mass Transfer* **38** (1996), p.1121.
- [11] Antohe, B. V. and Lage, J. L., "Experimental Investigation on Pulsating Horizontal Heating of an Enclosure Filled with Water," *J. Heat Transfer* **118** (1996), p.889.
- [12] Kwak, H. S., Kuwahara, K. and Hyun, J. M., "Resonant Enhancement of Natural Convection Heat Transfer in a Square Enclosure," Revision submitted to *Int. J. Heat Mass Transfer* (1997).
- [13] Kwak, H. S., Kuwahara, K., and Hyun, J. M., "Prediction of the Resonance Frequency of Natural Convection in an Enclosure with Time-Periodic Heating Imposed on One Sidewall," Revision submitted to *Int. J. Heat Mass Transfer* (1997).
- [14] De Vahl Davis, G. and Jones, I. P., "Natural Convection in a Square Cavity - A Comparison Exercise," *Int. J. Num. Methods Fluids* **3** (1983), p.227.
- [15] Gebhart, B. et al., "Buoyancy-Induced Flows in Water under Conditions in which Density Extremum May Arise," *J. Fluid Mech.* **89** (1978), p.673.
- [16] Braga, B. S. and Viskanta, R., "Transient Natural Convection of Water near Its Density Extremum in a Rectangular Cavity," *Int. J. Heat Mass Transfer* **35** (1992), p.861.
- [17] Kwak, H. S., Kuwahara, K. and Hyun, J. M., "Convective Cool-Down of a Contained Fluid through Its Maximum Density Temperature," To be appeared in *Int. J. Heat Mass Transfer* (1997).