自由對流와 그 應用 *

이　　　재　　　헌 **

Free Convection and its Applications

Jae　Heon　Lee

최근, 자유대류는 과학자와 엔지니어들의 중요한 연구분야가 되었다. 이 연구분야는 분할이 필요한 정도까지 확장되었고 다양한 분야로 더욱 더 발전하고 있다.

자유대류를 개관해 보면, 이 분야가 발전하게 된 주된 두가지 동기는 첫째 복잡한 수학성(Complicated mathematics)과 둘째 결과의 신뢰성(reliability)이라는 것을 알 수 있다. 세번째 동기로서는 그의 응용범위인데 이는 이 분야의 연구가 필요불가결함을 보여준다.

1. 서 론

자유대류는 수십년동안 열전달의 한분야로 생각되어 왔다. 이 분야는 열전달 교과서에서 보통 한 chapter로 취급되어 강제대류 chapter 뒤에 나타난다. 두 분야에 대한 구분은 우선 유동의 생성원인이다. 유동이 pump나 송풍기같은 기계적 장치에 의해 일어난다면 유동장내에 관련된 열전달은 강제대류로 표시된다. 왜냐하면 분명히 유동이 강제적이기 때문이다. 그러나 유동이 온도장에 의한 body force때문에 생겨났다면 이를 자유대류(free convection)라고 부르는데 이것은 body force가 중력에서 유래된 경우, 자연대류(natural convection)라고 불리우는 부수적인 분야를 가지고 있다. 명칭 구분 및 정의는 물론 편할대로 선택할 수 있다. 그러나 온도장과는 관계없는 강제대류와 온도장에 의한 자유대류의 이러한 정의는 전에 기대하지 않았던 발전을 하게 되었다. 이 두 현상이 구별되어지는 이유는 아래와 같다.

강제대류에 있어서 유동장의 계산은 초기에

* David Pnuel ; Free Convection and its Application, Proceedings of 7th International Heat Transfer Conference, Vol. 1, pp253-259, München, 1982에서 轉載

** 正會員, 漢陽大學校 工科大學

온도가 어디에서나 같다는 가정하에 시작되며 정립된 유동장(established flow field)에 적절한 온도값이 주어지고 열전달율이 계산된다. 점성계수등과 같은 유체물성치들은 온도에 의하여 변할 수 있다는 것을 명심해야 한다. 현재까지 이의 영향은 어떤 약간 다른 수치적인 결과를 가져올 수 있게하는 보정치 정도로 생각되어 왔다.

반면에 자유대류 유동에서는 영역의 경계에서 온도장이 먼저 확립되며 이후 유동장과 온도장이 서로 상호 연관되어 동시에 계산된다.

그러나 강제대류에 의해 이러한 방법으로 계산된 열전달율은 실험결과와 항상 일치하지는 않는다는 것이 분명하게 되었다. 그러한 차이에 대한 예제를 생각하는것은 별로 어렵지 않다. 간단한 3개의 예를 생각해 보자.

첫번째 예 ; 수직사각 챤넬에서의 완전히 발달된 층류유동을 생각하자. 챤넬의 벽을 각각 a, b, c, d라 하고 서로 반대면인 a와 c가 각각 다른 일정한 온도 T_a와 T_c를 유지한다고 하자. 이때 $T_c > T_a$, $T_c = T_a + \Delta T$이며 b와 c면은 단열되었다. a면이 밑면이고 입구영역에서 멀리 떨어진 곳에서의 온도와 열전달율을 고려하자. 즉 온도장도 완전히 발달되었다고 가정한다.

이 예제는 소위 Graetz problem이라고 불리우는 것들중의 하나와 같고 그 해는 쉽게 알 수 있듯이 유체가 유동하지 않는듯한, 즉 순수열전도문제에서 볼 수 있는 밑면에서 윗면까지 선형적인 온도증가이다. 그러나 이 경우 폐쇄된 유선을 갖는 2차유동(secondary flow)이 존재한다는 것이 알려져 있다 [1], [2], [3]. 즉 이 유동은 유동장에는 거의 영향을 미치지 않으나 열전달율과 온도장을 상당히 변화시킬 수 있다는 것이다.

그러므로 올바른 유동장을 정립하려면 2차유동에 대해 알아야 하고 열대류에 대한 그것의 영향을 고려해야만 한다. 그러나 이것은 이론적 어려움에 대한 예제는 아니다.

두번째 예 ; 이제 이 사각채널을 90° 돌려놓자 윗면과 아랫면이 이제 단열이고 옆면이 각각 T_a와 T_c의 온도이다. 이것은 완전히 다른 문제이므로 강제대류와 자유대류가 결합되었다고 할 수도 있다.

매우 빠른 유동과 매우 작은 ΔT에 대해 유동은 아마도 여전히 처음 상태일 것이다. 즉 $\Delta T = 0$인것과 같을 것이다. 그러나 ~~층류유동~~은 매우 빠르지 않으며 따라서 열전달율도 수정 되어야 될것이다. 여전히 자유대류와 강제대류가 정의된 방법 때문에 유동장에 있어서의 수정은 2차적(secondary)인 것이라고 불리고, 열전달에 있어서의 변화는 이 2차유동에 의해 좌우된다. 분명히 이 경우 유동장의 수정은 2차적인것일 필요가 없다. 그것은 2차적인 것이라고 불리울지라도 챤넬을 통하는 중심유동과 대등한 크기를 가질수도 있다. 두개의 평행한 수직벽 사이의 유동에서 자연대류가 고려된 참고문헌 [4]로 부터 볼때 이 두번째 예제는 일반적인 방법으로 풀기가 그리 쉽지는 않다.

이 문제에 대해서는 상세하게 후에 더 이야기하기로 하자. 이 단계에서는 열전달이 고려되는 한 온도장과 속도장 사이의 강한 상호 연관관계가 있음을 보여주고자 한다.

현재까지 사용되고 있는 정의에 의하면 유동과 열전달에 대해 올바른 답을 얻을때 운동량과 에너지 방정식을 독자적으로 고려할 수 있기만 하면 강제대류 영역에서의 문제로 생각한다. 그렇지 않으면 자유대류 영역의 문제가 된다. 본 논문에서 다른 정의를 제안하지는 않겠지만 자유대류의 영역내에서의 여러가지 문제의 식별에는 특별한 주의가 필수적이라는 것을 제시한다.

이러한 식별에 있어서의 힌트는 두번째 예제로 부터 나온다. 참고문헌 [4]에서는 수직한 두벽 사이에서의 자연대류의 경우를 연구하였으며 서로 완전히 다른 2개의 해를 보여 주었기 때문에 두번째 예제의 해가 유일한가 의문이다. 풀이과정에서, 정지상태에서는 유동을 시작시킬

수 있는 충분한 에너지가 없다고 주장하면서 참고문헌〔4〕의 두해에 각각 서로 다른 초기조건을 주고자 하는 시도가 있었다. 그러나 두번째 예는 이미 주유동(main flow)내에 충분한 에너지원(energy source)을 가지고 있다.

사람에 따라 이런 종류의 어려움이 안정성해석(stability analysis)에 있다고 할 수도 있다. 아마도 더 강한 유동에서의 해는 불안정할 것이나 저자는 그런 해석이 이루어 졌었는지를 알지 못한다.

세번째 예 ; 챤넬을 90° 더 돌려보자. 이제 높은 온도가 바닥에 존재한다. 챤넬의 크기나 온도차 그리고·유체의 물성치를 조정하여 유동이 시작하는 Rayleigh수를 넘지 않도록 하자.

이것은 분명히 자유대류 문제이다. 그것은 대부분의 2차원 열안정성(thermal stability) 문제보다 훨씬 더 어렵다. 그 해의 유일성이 풀려지지 않았고 그 문제를 두번째 예제처럼 간단히 안정성 해석으로 분류할 수 없다. 왜냐하면 이 문제가 바로 안정성해석에서부터 발생되었기 때문이다. 이 세번째 예의 어려움의 근원을 밝히려 하는것이 매우 교육적일 것 같다. 끝으로 이것보다 더 간단한 두개의 보조문제를 생각해보자. 첫째는 태양열 연못(solar pond)에서 물을 빼는 경우이다. 이때에 유동은 있지만 유동이 없는 조건에서의 유동의 안정성은 확신되고 있다. 이 문제는 부분적으로 풀려졌다〔5〕〔6〕. 두번째 보조문제는 〔7〕,〔8〕에 보고된것과 같은 주유동이 없는 밑면에서 가열되는 수평원통에서의 문제이다. 이것은 실험적으로 조사되었으나 그 해를 측정할 수 없었다. 혹은 그 보다는측정 값들을 재현할 수가 없었다고 할 수 있다. 이 문제에서의 어려움은 유동문제에서가 아니라 주로 안정성 문제에서 생기는 것 같다.

그러므로 자유대류로의 일반적인 분류는 그 해를 얻는데나 그 현상을 이해하는데 도움을 주거나 하지는 못한다. 본 논문에서는 자유대류에서 일어나는 어려움을 몇개의 공통적인 어려움으로 분류해보고 이러한 분류가 자유대류현상의 이해에 도움을 주는데 목적이 있다.

2. 수학적인 개관

2.1 일반적인 문제

일반적인 자유대류 현상은 다음 3가지로 분류될 수 있다.

(1) 밀도구배가 중력장에 수직이다. 유동은 즉시 시작한다.

(2) 밀도구배가 중력장에 평행하다. 온도영향을 포함하는 단일확산성물질(single diffusive component)의 경우에 밀도구배는 중력장에 반대방향이다. 두종류 물질로 이루어진 계에서 중력장은 밀도구배와 같은 방향일 수도 있다. 그런 경우 유동은 Rayleigh수가 어떤 임계값을 넘을 때 일어난다. 유동을 일으키는 성질은 유체영역에 포함된 Rayleigh수와 기하학적 형상 뿐만 아니라 유동을 시작하게 하는 착란의 특성에 좌우된다.

(3) 위의 (1)과 (2)의 복합형태, 다시 말해서 밀도구배는 중력장에 수직하기도 하고 평행하기도 한 방향을 가지고 있다.

수학적으로 위의 3가지를 검토하면 첫 부류는 바로 경계치문제(boundary value problem)이고, 두번째 부류는 특성치(characteristic value) 또는 고유치(eigen value) 문제이고, 세번째 부류는 위의 두가지가 복합된 문제로 생각될 수 있다.

수직벽을 따라 흐르는 유동과 같은 외부운동은 첫부류에 가까울 것 같다. 이것은 외부유동에서 밀도구배가 대부분의 유동영역에서 수평에 가깝다는 것이다. 자연적으로 생기는 공학적 상황은 아래와 같다. 즉 두개의 등온수직벽 사이의 유동, 하나의 등온벽, 일정한 열속을 갖는 단일벽, 등온핀, 밑변이 뜨거운 기울어진 벽을 따라 혹은 윗면이 차가운 기울어진 벽을 따라 흐르는

유동, 태양 연못 등에서이다.

대부분의 공학적 상황은 3번째 부류에 속한다. 다시 말해 밀도구배가 body force field의 방향에 기울어져 있다. 실제로 어디에서나 밀도구배가 수평인 외부자유대류(external free convection)를 얻기란 불가능하다. 아마도 유동이 없고 열적으로 완전히 정상상태에 도달한 경우에는 밀도구배가 수직인 상태가 얻어질 수 있을 것이다.

이 논문의 목적은 공학적 상황을 개관하는 것에도 있다. 그리고 이것의 대부분이 3번째 부류에 속한다는 것이 밝혀졌으므로 이 단계에서는 중력방향에 대한 밀도구배의 방향에 따른 분류방법을 택하지 않는 것이 도움이 될 것이다. 그 대신에 공학적 상황을 경계치문제, 고유치문제, 그리고 복합형문제 등으로 분류한다.

수직표면에서의 외부유동은 대부분이 경계치문제이다. 수직한 밀도구배의 경우는 고유치문제이다. 대부분의 내부유동은 경계치문제와 고유치문제의 혼합형이다. 뒤에서 보겠지만 이러한 분류는 여러경우에 속하는 문제를 다루는데 필요한 노력이 어느 정도인지를 말해준다.

자유대류를 해석적으로 조사하는데 필요한 방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 혹은 확산방정식들이다. 어떤 경우에는 이것이 경계층방정식으로 간단화될 수 있다. 이러한 변화가 식의 특성을 바꾸고 완전한 방정식이 공간에서 elliptic인 반면 경계층방정식은 parabolic이라는 것을 명심해야 한다. 그 의미는 경계층방정식이 경계조건의 영향을 유동의 반대방향으로 적절히 전달하지 못한다는 것이다. 이것은 내부유동을 다루는데 있어서 경계층방정식의 효과를 상당히 감소시킨다. 경계층방정식을 사용하는데는 열적인 안정성에 관한 고유치 문제를 좀 더 다루어야 되는 것과 같은 추가적인 노력이 당연히 요구된다.

2.2 고유치문제

열적인 안정성에 관한 고전적인 고유치문제는 다음과 같이 설명한다.

어떤 주어진 기하적 형상에서는 일련의 경계조건에 대해 지배방정식은 모든 속도가 0인 해를 가질 수 있다. 속도가 0이 아닌 다른 해가 있을 수 있을까? 그런 해가 존재한다면 그 상황은 불안정하고 고유치문제는 non-trivial 해를 갖는다. 안정성에 대한 기준은 임계 Rayleigh 수라 불리는 어떤 Rayleigh수의 최소값으로 대개 공식화된다. 다시 말해서 불안정성 문제, 즉 고유치 문제에 대한 non-trivial해는 단지 임계 Rayleigh수 이상의 Rayleigh에 대해서만 얻을 수 있다. 따라서 이 임계 Rayleigh수가 고유치이다.

이제까지 설명에서 본 바와 같은 것은 대부분 다른 고유치문제에서 접할 수 없었던 거동이다.

a. 지배방정식의 첫번째 고유치, 즉 수학적으로 만족되는 가장 작은 Rayleigh수는 물리적으로는 만족하지 않기 때문에 때때로 인정할 수 없다. 이에 대한 이유는 수직성분의 속도장에서 어떤 nodal line이 부족하기 때문이다. 그렇지 않다면 비록 연속방정식이 사용되었지만 잉여유동성분이 있으며 질량보존을 만족할 수 없다. 그래서 물리적으로 가장 낮은 고유치 즉 임계 Rayleigh수는 수학적으로는 두번째 고유치이다. 대칭인 수직평판이 존재하는 경우에 이 현상은 계산과정에 있어서 약간의 수정을 요할 것이다. 그러나 그런 대칭면을 갖지 않는 일반적인 영역에 대해서는 계산은 훨씬 더 복잡하게 될 수도 있다.

b. 임계값을 넘는 Rayleigh수에 대해 항상 non-trivial해가 존재한다. 이것은 여기에서 고유치의 스펙트럼이 연속적이며 임계 Rayleigh 수가 가장 아래쪽에 있는 연속적인 고유치의 스펙트럼이 존재한다는 것을 의미한다. 물리

적으로 연속적인 스펙트럼을 갖는 공학적 상황은 별로 많지 않다. 의미를 강조하기 위해 다른 고유치문제 즉 어떤 기둥의 좌굴문제를 간단히 생각하기로 하자. 좌굴에서의 첫번째 고유치 즉 임계하중은 기둥을 좌굴시키는 원인이 된다. 두번째 고유치는 기둥이 어떤 형태로 지지되어 있을때 좌굴을 일으키는데 필요한 하중을 줄지도 모른다. 그러나 이렇게 지지된 기둥은 첫번째 고유치를 위배하는 전혀 다른 문제이다. 지지가 없는 경우 두번째 임계하중은 적용될 수 없다. 왜냐하면 기둥은 이미 그 전에 좌굴되었을 것이기 때문이다. 그러므로 동적인 효과가 포함되지 않는한 임계하중의 1.5배를 받는 기둥에서 일어나는 현상을 조사한다는 것은 무의미하다. 그러나 간단하게 열적경계조건을 조절함으로써 임계 Rayleigh 수의 1.5배를 밀폐공간내의 유체가 받도록 하는 것은 가능하다. 유체가 어떻게 변할 것인가에 대한 부분적인 힌트는 기둥좌굴해석, 즉 동적거동의 해석으로부터 얻을 수 있다. 완전한 설명을 위하여 이 고유치문제의 좀 더 근본적인 성질들을 알아야 한다.

c. 참고문헌 〔11〕,〔12〕에 있는 기하학적형태에 대해서는 System의 지배방정식이 단순하다. 이것은 고려되는 유체의 증가가 유동의 안정성을 감소시킨다는 뜻이다. 경계의 한 부분을 새롭게 바꾼다고 해서 유동을 안정시킬 수 없다는 것을 의미한다. 이러한 연구에서 나타난 해는 같은 열적경계조건하에서만 유효하다는 것을 명심해야 한다. 즉 이미 존재하는 물질과 들어오는 물질은 그들의 바깥쪽 고체 경계면에서 똑같은 경계조건들을 갖는다. 임계 Rayleigh 값의 1.5배를 받는 밀폐공간문제는 이제 부분적으로 풀려진다. 밀폐공간 내부에서 임계 Rayleigh 값을 갖는 작은 구역이 있는데, 이곳이 불안정하여지고 유동이 시작할 것이다. 이것은 영역내의 온도장의 변형과 임계 Rayleigh 값을 갖는 불안정한 작은 구역을 재조정하게 한다. 이 작은 구역내에 유동이 있을때 윗면과 아랫면의 온도차가 감소하므로 그 작은 영역은 임계 Rayleigh 값을 다시 얻기 위해 약간 더 커지는 경향이 있다. 고려하는 전체 구역내에 이렇게 작용하는 작은 구역이 단 하나 있다고 가정하면 이 재조정에 의하여 유체영역의 나머지 부분은 다시 임계 Rayleigh 값을 얻기 때문에 불안정성이 시작되려는 경향은 차츰 사라진다. 움직이는 경계조건 역할을 하는 불안정한 영역 때문에 유동하고 있는 여타 영역은 상기 설명한 이러한 경향 때문에 안정되려고 한다는 설명이 참고문헌〔13〕에 나와 있다.

d. 비록 고유치 문제가 정지상태에서 움직이기 시작하는 유동에 대해 체계화 되었지만, 얻어진 고유함수는 반드시 시간적인 함수가 될 필요는 없다. 소위 흔들리는 파동이라는 것이 참고문헌〔14〕에서 매우 높은 Rayleigh 값의 경우에 실험적으로 관찰되었다. 연구가에 따라서는 이것을 난류운동의 일부로 간주할 수도 있다. 그러나 밑으로부터 가열되는 원통형 외곽에 있어서의 이 측정은 재현성이 없다고 참고문헌〔7〕에서 보고되었다. 비록 약간 다르지만 비슷한 실험이 〔9〕에서 보고되었으며 저자는 24시간동안의 실험관찰에 의하여 이를 점검한 결과 〔9〕에서 언급한 측정치가 시간의 함수라는 것을 발견하였다. 그러므로 〔7〕과 〔9〕에서는 난류유동과는 동떨어진 불안정한 유동의 경우를 보고하였다. 마지막으로 유동이 층류이고 선형안정성이론이 타당하다고 생각되어지는 느린 유동에서 조차 열안정성문제는 언제나 시간의 함수인 해를 갖지는 않는다고 참고문헌〔15〕에서 보여주고 있다. 이러한 의미는 얻어진 여러 형태의 해가 시간에 따라 변하며 최종 정상상태에 머무르지 않으며 결코 반복하지도 않는다는 뜻이다.

참고문헌〔15〕에서의 증명이 비선형 안정성이론에까지 확장되지 않는다는 것을 알면 도움이 될 것이다. 이러한 안정성이론에 위배되는 유동에 대해서도 난류유동해석에서와 같이 평균

적인 양적으로 생각할 때는 정상상태의 해가 여전히 존재한다.

2.3 혼합형문제

혼합형문제는 경계조건이 경계치문제와 고유치문제가 중첩된 경우라고 생각되어질 수 있는 문제로 우선 정의한다. 그렇다고 고유치문제가 경시되어서는 안된다. 다시 말해서 특별한 경계조건에 대해 그것은 non-trivial 해를 가져야만 한다.

고유치문제를 설명하는데 있어서 일반적인 영역은 그 자체가 불안정한 유동구역과 이러한 불안정한 작은 구역때문에 생기는 유동영역으로 나누어진다고 볼 수 있다. 혼합형문제에서는 경계가 움직이는 작은 불안정 영역을 다시 볼 수 있는데 이 영역 주위에서의 운동은 반드시 이러한 불안정영역의 운동에 의해서만 생기는 것이 아니고 두 현상이 결합되어 나타난다. 더 나아가 혼합형문제의 정의가 경계조건 바깥쪽에서 뿐만아니라 경계값문제 유동의 결과로써 내부유체에 나타날지도 모르는 불안정한 영역까지 확장된다.

이제 자유대류와 강제대류 양쪽에 모두 속한다고 분류된 어떤 문제들은 서론의 두번째 예제처럼 혼합형 강제대류 경계치문제로 생각할 수 있다는 것을 알았다. 또는 이 문제는 서론의 세번째 예제인 경계치-고유치 혼합형문제로 생각될 수도 있으며 고유치문제가 나타나지 않는 세번째 예제나 첫번째 예제처럼 순수한 강제대류로 생각될 수 있다.

2.4 선정된 문제

이제 여러 사람에 의해 발표된 매우 일반적인 예제들을 생각해보자. 각 예제는 그때까지 개발된 여러 개념의 항으로 수학적 복잡성을 나타내고 있다.

이런 간단한 개관은 무리가 아니다. 오히려 많은 사람들이 쏟았던 노력들을 연구함으로써 문제를 일반화시키고 이 논문에서 시도하고자 한 것과 같은 결론을 내리는 좋은 방법인 것이다.

참고문헌들을 이해하기 쉽지는 않지만 이연구에서 도달하고자 하는 결론을 보여주는데 좋은 예제라는 근거에서 선택되었다.

문제 1 : 수직벽 혹은 약간 기울어진 벽이나 핀에서의 자유대류 열전달. 참고문헌 : [4], [16]-[21].

풀이 : Grashof 수나 Rayleigh 수에 대한 유연한 종속성을 나타내는 결과는 자연스럽게 층류에서 난류로 확장된다.

수학성 : 경계치문제. 그러나 대부분의 수평판에 대해 문제는 경계값 및 고유치문제의 혼합형이 된다.

문제 2 : 뜨겁고 차거운 수직벽을 갖는 얇은 간격 내에서의 자유대류 열전달. 참고문헌 : [14], [22]~[29].

풀이 : 수직온도구배와 함께 일어나는 경계층과 같은 유동에 의하여, 그리고 제어체적의 모퉁이 주위에 있는 유선이 소용돌이 혹은 고양이의 눈같은 모양을 이루는 변화에 의하여, 또한 벽면 근처에서 전단력의 불안정성과 중앙유동의 난류화에 의한 거의 순수한 전도영역으로 부터의 작은 Rayleigh 수 (1000 이하) 일때의 유연한 천이과정

수학성 : 경계치문제

문제 3 : 뜨거운면이 아래에 있을때 수평 slot 안에서의 자유대류 열전달 참고문헌: [11], [30]~[39], [40]~[42], [43]~[46].

풀이 : 참고문헌 [11], [30]~[39]는 불안정성의 시작을 다루고 있다. [40]~[42]는 유동형태에 대한 시간에 종속적인 해를 예측하고 고찰한다. [43]~[46]은 열전달을 상호연관지우려고 시도하였다. 이 문제에 있어서의 열전달에는 여전히 의문점이 남아있다.

수학성 : 열전달의 계산에는 반드시 불안정한 영역의 크기, 모양 및 위치등의 결정이 포함되어야 한다.

문제 4 : 너비와 높이의 비가 10 이하인 수평 공간내에서의 자유대류 열전달, 바닥 혹은 거의 바닥 가까운 곳으로부터 가열되는 경우

참고문헌 : [7], [8], [11], [47]~[55]

풀이 : 불안정성의 시작을 결정. 유동형태의 결정. 유동을 일으키는 불안정한 영역 즉 윗벽과 아래벽 근처에서 강한 온도구배영역, 그리고 이러한 불안정영역에 의해 유도된 거의 고체처럼 회전하는 내부영역으로의 구분. 중앙영역의 온도 분포는 등온일수도 성층되어 있을수도, 성층되었으면서 경사되어 있을 수도 있다. 어떤 결과는 시간에 종속적일 수도 있다. 풀이는 수치방법과 경계층 근사방법을 포함한다. 열전달의 수치계산에 대한 Meager 의 data 가 있다.

수학성 : 고유치문제, 혹은 경계치 및 고유치 문제의 혼합형, 벽근처에서의 경계층 근사방법은 벽 근처에서의 영역의 불안정성에 좌우될수도있는 core 의 거동에 대한 정보를 미리 요구한다. 수치방법은 이것을 요구하지 않고도 문제의 경계치부분을 다룰 수 있으나 고유치문제 부분을 빠뜨릴 수도 있다. 열전달에 대한 예측은 문제 3 에서 처럼 완전한 해를 요구한다.

문제 3 과 문제 4 에서 열전달을 좀 더 잘 계산할 수 있는 경우가 있다는 것을 알 수 있다. 열전달을 억제하도록 고안된 기구에서는 불안정을 억누르는데 노력을 쏟아야 한다. 직접 쉽게 조정할 수 있는 변수는 공간의 크기이므로 단열의 목적으로는 공간의 크기를 불안정성이 사라질때까지 줄여야 한다. 이런 경우 고유치문제는 사라지고 열전달율이 쉽게 예상될 수 있는 열전도문제와 비슷하게 되며 그 현상의 해석은 경계치 문제가 된다.

3. 자유대류의 확실성

자유대류의 초보적인 정의 즉 body force 로 인해 유동이 일어난다는 정의를 생각하면 자유대류는 확실성이 있다. 대부분의 경우 body force 는 중력이고 중력의 존재는 확실하다. 물론 터어빈날개의 자유대류 냉각문제에서 예를 들면 body force 를 고려할 필요가 없을때도 있지만 이때는 벌써 냉각할 필요가 없을때이다. 자유대류 열전달연구는 더이상 그 초보적인 정의에 의하여 한정되지는 않는다. 자유대류문제 모두가 그렇게 간단하지는 않다는 것을 보여주기 위하여 현재의 연구를 중단하라고 요망하고 싶다. 이것은 분명히 더이상 풀어야 할 새로운 문제가 아직껏 없다는 뜻이 아니고 계의 내부 혹은 근처에 존재하는 진동, 복사, 소음등과 같은 하찮은 변수의 변화때문에 재현할 수 없는 실험결과가 존재한다는 말이다. 재현할 수 없다면 현상을 예견할 수도 없고 그러므로 신뢰할 수도 없다.

지금까지 사실을 일반화 한것처럼 보이는 수학적인 문제의 성격에 따라 분류하는 것은 자유대류를 연구하는 엔지니어들의 중요한 일이 되었다. 경계치 문제는 믿을만 하다. 기술자가 사용하길 원하는 관계식이 옳지 않을지도 모르나 이때는 그것을 점검하거나 계산 또는 실험을 다시 행할 수 있다. 그러나 일단 자기의 올바른 결과를 확신하면 그것들을 자신있게 다시 사용해도 좋다. 고유치 문제는 몇개의 예외는 있지만 믿을 만하지 못하다. 점검한 관계식 또는 심지어 재현할 수 있는 실험결과를 가지고도 그 결과들을 원래 실험했던 계와 거의 비슷한 다른 계에 자신있게 적용할 수는 없다.

고유치 문제를 믿을 수 없는데 대한 예외는 열전달을 원하지 않을때, 즉 단열층을 설계할때이다. 다공질물질 또는 고유치문제로 인정할 수 있는 어떤 다른 형상을 사용한다고 가정하면 불안정성이 나타나지 않도록 설계해야만 한다. 계의 내부에서 가장 큰 온도차 또는 다공성물질의 가장 큰 기공의 크기를 임계값 이하의 Rayleigh 수가 나타나도록 설계한다. 일단 이것이 이루어지면 이 설계는 자유대류에 관하여서는 믿을

만 하다. 이 예외는 이 경우에 고유치 문제를 고려하지 않아도 되었기 때문이지 정말 예외라고 할 수는 없다.

경계값-고유치 혼합형 문제는 역시 확실성이 없으며 고유치 문제에 대하여 논의된 모든것은 혼합형 문제에도 적용된다. 예를 들면 다공질 절연물질에서의 문제는 순수 고유치 문제라기 보다 혼합형 문제의 부류에 들어간다.

4. 자유대류연구의 응용

엔지니어들은 믿을만한 system을 설계하길 기대한다. 신뢰도를 고려하는데 나타나는 어려움은 자연대류를 고려하는 대신 강제대류를 고려해서 설계해야 하는 다소 불편함을 야기시킨다는 것이다. 이미 서론에 언급했듯이 문제의 고유치 특성은 때때로 강제대류에 의하여서도 방해받을 수 있다. 그 외에도 엔지니어에게는 실제로 자연대류가 강요되는 상황이 있다. 그런 경우의 예는 다음과 같다.

전화회사는 그 전화선을 따라 어떤 증폭회로를 갖고 있다. 증폭기는 높은 전압을 공급하는 전원으로 구성된다. 이 출력은 변환되고 수정되어 여러전압의 직류로 나오는데 이는 장거리 전화통화에 이용된다. 이런 기기의 위치는 중요기기 혹은 쉬운 수송수단으로 부터 멀리 떨어져 있기도 하므로 일반적인 개념으로는 전자부품의 신뢰한도인 약 10 ~ 15 년간 점검이나 수선이 필요하지 않는 증폭기가 요구될 것이다. 전자부품은 냉각이 필요한데 기계적인 fan 또는 압축기도 10 ~ 15 년의 신뢰한도밖에 갖지 못한다. 그러므로 엔지니어는 어쩔 수 없이 자유대류 문제도 이해하여야 한다.

자유대류 열전달현상이 필수적인 더 많은 예를 물론 열거할 수 있으며 일상생활 주위에서 이런예를 많이 보여줄 수도 있다. 그대신 똑같은 전화회사에서 다루어져야만 하는 다른 예를 들어 보면 다음과 같다. 온도에 민감한 몇개의 부품을 포함한 어떤 상자모양의 밀폐된 기기는 자연대류에 의해 천천히 냉각되어야 한다. 이 기기의 전면에는 핀이 달려 있으며 공기순환을 위해 상하 공기구멍을 갖는 큰 cabinet 내에 위치해 있다. 제법 큰 출력용 변압기도 또한 cabinet 내에 위치해 있어야 한다. 변압기는 열에 아주 민감하지는 않지만 상자모양의 기기에서 방출되는 에너지의 약 10배 정도의 에너지를 방출한다. 문제는 어떻게 두개의 unit를 묶느냐는 것이다. 그 답은 변압기를 이 민감한 기기보다 낮게 놓아두고 한쪽면을 띄워 놓는다. 변압기 위로 상승되는 plume은 민감한 기기의 평평한 윗면에서 형성될지도 모르는, 밑으로부터 가열되는 안정된 유동형태를 흐뜨려 놓는다.

마지막 예 : 혼합되지 않으며 서로 다른 색깔을 갖고 있는 두 유체로 채워진 유리구 또는 원통으로 구성되있는 장식 장치가 있다. 두 유체는 근사적으로 같은 밀도를 갖는다. 유리용기는 전기적으로 밑으로부터 가열된다. 이는 고유치 또는 혼합형 문제이다. 유동형태는 스스로 반복되지 않으며 감상하는 눈에 시간에 따라 변하는 매력을 보여준다.

참 고 문 헌

1. Prandtl, Verhandlungen des 2 internationalen Kongresses fur technische Mechanik Zurich, p.70, 1926.
2. Nikuradse, Ingenieur-Archiv, 1, p.306, 1930.
3. Goldstein, S., Modern Developments in Fluid Dynamics, S., Modern Developments in Fluid Dynamics, p. 359, Dover, 1965.
4. Ostrach, S., NACA TN 4273, 1958.
5. Pnueli, D. and Zvirin, Y., Int. J. Desalination, 33, 2, 163, 1980.

6 . Bouscher, M., Pnueli, D. and Zvirin, Y., Int. J. Desalination, 36, 307, 1981.
7 . Sabzevari, A. and Ostrach, S., Experimental Studies of Natural Convection in a Horizontal Cylinder, Case Inst. of Tech., Cleveland, Ohio, FTAS/TR-66-8, AFOSR Sci. Rep. No. AFOSR 66-1401 (1966)
8 . Hantman, R. and Ostrach, S., Natural Convection Inside a Horizontal Circular Cylinder, Case Western Reserve Univ., Cleveland, Ohio, FTAS/TR-69-36 (1969).
9 . Ostrach, S. and Pnueli, D., J. Heat Transfer, ASME, 85, 346, 1963.
10 . Pnueli, D., J. Appl. Mech., ASME, 31, 3, 376, 1964.
11 . Pnueli, D., Int. J. Heat and Mass Transfer, 18, 1213, 1975.
12 . Pnueli, D., Israel J. Tech., 18, 3, 117, 1980.
13 . Pnueli, D., Letters in Heat and Mass Transfer, 2, 6, 495, 1975.
14 . Elder, J.W., J. Fluid Mech., 23, Part 1, 77, Part 2, 99, (1965).
15 . Pnueli, D. and Iscovici, S., " The Asymptotic Thermal Stability of Confiend Fluids ", J. Eng. Math., 2, 1, 53, 1968.
16 . Elenbas, W., Physica, 9, No.1, 1, 1942.
17 . Elenbas, W., Physica, 9, No.9, 865, 1942.
18 . Elenbas, W., Philips Rep., 3, 338, 450, 1948.
19 . Rich, B.R., ASME Paper 52-F20, 1952.
20 . Sparrow, E.M. and Gregg, J.I., ASME Paper 55-5A4, 1955.
21 . Pnueli, D., J. Heat Tr. ASME, 96, No. 4, 545, 1974.
22 . Poots, G., Quart. J. Mechanics and Applied Mathematics, 11, 257, 1958.
23 . Eckert, E.R.G. and Carlson, W.O., Int. J. of Heat and Mass Transfer, 2, 106, 1961.
24 . Taylor, G.I., International Symposium on the Use of Models in Fire Research, Publication 786, National Academy of Science-National Research Council, 10, 1961
25 . Batchelor, G.K., Quarterly of Applied Mathematics, 12, pp. 209-233, 1954.
26 . Gill, A.E., J. Fluid Mechanics, 26, 515, 1966.
27 . de Vahl-Davis, G., Int. J. Heat and Mass Transfer, 11, 1675, 1968.
28 . Catton, I., Ayyaswamy, P.S. and Clever, R.M., Int. J. Heat and Mass Transfer, 17, 173, 1974.
29 . Quon, C., Physics of Fluids, 15, 12, 1972.
30 . Spradley, L.W. and Churchill, S.W., J. Fluid Mechanics, 20, 705, 1975.
32 . Chandrasekhar, S., Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. Oxford University Press, 1961.
33 . Jeffreys, H., Phil, Mag., 2, 833-344, 1926.
34 . Pellew, A, and Southwell, R.V., Proc. R. Soc. A176, 312-343, 1940.
35 . Davies-Jones, R.P., J. Fluid Mech., 44, 695-704, 1970.
36 . Charlson, G.S. and Sani, R.L., Int. J. Heat and Mass Transfer, 13, 1479-1496, 1970.
37 . Charlson, G.S. and Sani, R.L., Int. J. Heat and Mass Transfer, 14, 2157, 1971.
38 . Davis, S.H., J. Fluid Mech., 30, 465, 1967.
39 . Catton, I., J. Heat Transfer, 92, 186

1970.

40 . Sani, R.L., J. Fluid Mech., 20, 315, 1964.

41 . Busse, F.H. and Whitehead, J.A., J. Fluid Mechanics, 60, 67, 1974.

42 . Krishnamurti, R., J. Fluid Mechanics, 42, 309-320, 1970.

43 . Carrol, J.J., Ⅲ, Ph. D. Dissertation, University of California, Los Angles, 1971.

44 . Rossby, H.T., J. Fluid Mechanics, 36, 309, 1969.

45 . Chu, T.Y. and Goldstein, R.J., J. Fluid Mech., 60, 141, 1973.

46 . Malkus, W.V.R., Proceedings of the Royal Soc., 225, 185, 1954.

47 . Willis, G.E. and Deardorf, J.W., Physics of Fluids, 10, 1861, 1967.

48 . Ostroumov, G.A., NACA TM 1407, 1958.

49 . Batchelor, G.W., Quart. Appl. Math., 12, 209, 1954.

50 . Poots, G., Quart. J. Mech. Appl. Math 11, 257, 1958.

51 . Batchelow, G.W., J. Fluid Mech., 1, 177, 1956.

52 . Martini, W.D. and Churchill, W.S., AICHE J., 6, 251, 1960.

53 . Hellums, J.D. and Churchill, S.W., AICHE J., 8, 692, 1962.

54 . Eckert, E.R.G. and Carlson, W.O., Int. J. Heat Mass Transfer, 2, 106, 1961.

55 . Gill, A.E., J. Fluid Mech., 26, Part 3 515, 1966.

56 . Pnueli, D. and Iscovici, S., Israel J. Tech., 5, No. 4, 243, 1967.