

다공성 매질내 유체의 대류열 전달에 관한 실험 및 이론적 연구

신안식 · 이재욱* · 서문호

아주대학교 공과대학 화학공학과

*서강대학교 이공대학 화학공학과

(1985년 4월 4일 접수, 1985년 6월 3일 채택)

Experimental and Theoretical Studies of Convective Heat Transfer in a Porous Medium

An Shik Shin · Jae Wook Lee* and Moon Ho Suh

Department of Chemical Engineering, Ajou University, Suwon 170, Korea

**Department of Chemical Engineering, Sogang University, Seoul 121, Korea*

(Received 4 April 1985; accepted 3 June 1985)

요 약

다공성 매질내 유체의 자연대류에 관한 제반 현상을 Rayleigh수의 변화에 따라 포괄적으로 연구하기 위하여 실험을 수행하고, 이 결과를 이론적으로 해석하기 위하여 수치모사를 행하였다. 실험 장치는 염료를 이용한 유동가시화(flow visualization) 실험을 위하여 얇은 유리상자를 제작하고, 유리구슬과 증류수를 채워 다공층을 구성하였으며, 상하면의 온도차를 변화시켜 자연대류를 유도하였다. 수치모사에서는 유동가시화를 위한 유리상자형 실험장치의 전후면에서의 열손실을 고려하기 위하여 핀(fin)이론을 도입, 수식화하고, 이차원 자연대류에 대한 유동 및 온도분포에 관한 미분방정식들을 유도한 다음 유한차분법으로 해를 구하였다.

상기 연구의 결과 온도분포와 열플럭스에 대한 지식뿐만 아니라 다양한 유동셀의 변화를 유동가시화로 관찰할 수 있었으며, 실험 및 이론적 해석의 결과들은 상호 정성 및 정량적 비교가 가능하였다.

Abstract - The phenomena of natural convection in a fluid-saturated porous medium were studied experimentally for a wide range of Rayleigh number. The experiments were carried out in a rectangular glass tank of very small width to facilitate flow visualization. Mixtures of glass beads and distilled water were used as a porous bed. The bed was heated from below and cooled from above, and the flow was visualized by photographing dye streaks.

A theoretical analysis was also included to simulated the experimental results. In the analysis the thin rectangular box was thought of a fin losing heat to the surroundings in order to examine the effect of lateral heat losses.

The experimental results contain both quantitative information on the temperature fields and flow visualizations on the various convective flow patterns. The convective flow behavior of the numerical simulation was qualitatively identical to that of the experiment.

1. 서 론

다공성 매질내 유체의 유동 및 전열현상에 관한 연구는 유체의 열적 불안정성, 다양한 대류유동셀(flow cell)의 변화거동 및 전열방식의 변화등에 대한 학문적인 관심과 아울러 지열의 에너지화, 건물의 단열, 석유의 채유 등의 공정에 대한 응용을 목표로 산업적인 흥미를 더해가고 있는 바, 이러한 다공성 매질내 유체의 자연대류에 관한 연구는 전도열전달 상태에서부터 대류유동으로 전환되는 열적 불안정 임계조건을 결정하는 연구와 임계점 이후의 제반 유동 및 열전달특성 연구로 대별된다.

대류유동이 시작되는 임계조건에 대한 연구는 Horton과 Rogers[1], Lapwood[2]에 의하여 시작되었는데 이들은 각각 일정온도로 유지되는 무한한 두 불투수층(impermeable layer) 사이에서의 임계 Rayleigh수를 선형 안정성 해석을 통하여 결정하였으며, 이들의 이론은 그후 다공성 매질의 다양한 기하구조[3, 4]와 경계면 조건[5~7]에 대하여 확장되어 왔다.

정상상태의 대류유동이 시작되는 즉 임계 Rayleigh수 이후의 자연대류에 대한 이론적 연구는 유동 및 전열현상을 복합적으로 해석해야 하는 어려움으로 인하여 주로 컴퓨터를 이용한 수치모사법에 의존하고 있는데, 바닥에서 가열되는 불투수층 사이에서의 연구[8, 9], 투수성 또는 불투수성 벽으로 둘러싸인 상자형 다공성 매질을 모델로 한 연구[10~14]들이 발표되어 있다.

이와 같이 다공성 매질내 유체의 자연대류에 관한 연구는 여러 방면으로 진행되어 왔으나, 수치모사를 통한 이론적 해석이 대부분이며 이들 이론적 연구의 결과들을 확인해 줄 수 있는 실험들은 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 유리구슬과 증류수를 채운 상자형 다공층을 구성한 다음 염료를 이용한 유동가시화 실험을 통하여 대류유동 및 전열현상을 관찰하고자 하며, 실험에 사용된 다공층을 모델로 수치모사를 병행함으로써 이론과 실험 연구를 동시에 수행하고 그 결과들을 상호 비교 검토 하고자 한다.

2. 이론전개 및 수치모사법

본 연구에서는 유동가시화 실험을 위하여 Fig. 1

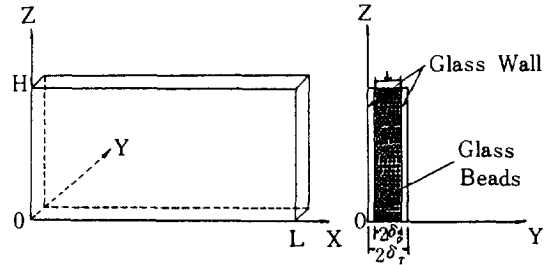


Fig. 1. Schematic diagram of the rectangular box of fluid-saturated porous medium.

과 같이 얇은 유리상자를 제작한 다음, 유리구슬로 다공성 매질을 구성하고 증류수를 채웠다. 실험에 사용된 다공층의 경계조건은 윗면은 등온(T_{top})으로 냉각되는 투수성이고, 바닥은 등온(T_{bot})으로 가열되는 불투수성이며 상자의 수직 벽면들은 모두 불투수성이다. 두께가 얇은 측면들은 단열되어 있으나 유동가시화 실험을 위하여 유리상자로 제작함에 따라 전후면에서는 주위와의 열전달이 일어나고 있다.

얇은 상자형 다공층에서의 유동 현상은 Darcy-Boussinesq의 가정을 도입하여 이차원으로 모사할 수 있고[19], 에너지식은 유체, 다공성 매질, 유리 벽에 대한 에너지식들을 결합하여 구할 수 있으며, 벽면에서의 열손실은 핀(fin)이론에 의하여 주위공기의 온도와 전열계수의 함수로 나타낼 수 있으므로 무차원 기본방정식들은 다음과 같이 유도된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$0 = -\nabla p - \nu + Ra(\theta - \theta_0)\mathbf{e}_z, \quad (2)$$

$$\frac{(\rho C_p)_{eq}}{(\rho C_p)^*} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\mathbf{v}\theta) = \nabla^2 \theta - N^2(\theta - \theta_{amb}). \quad (3)$$

여기서 \mathbf{v} 는 무차원 Darcy 속도벡터이고 \mathbf{e}_z 는 수직 방향의 단위벡터이다. 변수들의 무차원화는 길이는 H , 속도는 $k_{eq}/(\rho C_p)^*/H$, 압력은 $\mu_r k_{eq}/(\rho C_p)^*/K$, 시간은 $H^2(\rho C_p)^*/k_{eq}$ 을 특성치들로 하여 행하였으며, 무차원 온도 θ 는 $(T - T_{top})/(T_{bot} - T_{top})$ 으로 정의된다. 식 (2)에서 무차원 Rayleigh수 Ra 는

$$Ra = \frac{gK\beta_r(T_{bot} - T_{top})H}{\nu_r[k_{eq}/(\rho C_p)^*]} \quad (4)$$

로 정의되며, 식 (3)의 N^2 는 $N^2 = hH^2/k_{eq}/\delta_r$ 로 정의한 무차원 전열계수이다. 한편 물성치들은 예비 실험을 통하여 측정 사용하며, 상당 열전도도 k_{eq}

와 상당 열용량 $(\rho C_p)_{eq}$ 및 $(\rho C_p)^*$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$k_{eq} = \phi_f k_f + \phi_s k_s + \phi_{si} k_{si} \quad (5)$$

$$(\rho C_p)_{eq} = \phi_f (\rho C_p)_f + \phi_s (\rho C_p)_s + \phi_{si} (\rho C_p)_{si} \quad (6)$$

$$(\rho C_p)^* = (\rho C_p)_f \cdot \delta_p / \delta_T \quad (7)$$

식 (7)에서 δ_p / δ_T 는 전체 부피중 다공층이 차지하는 부피의 비가 되며, 하첨자 f, s, si 들은 각각 유체, 다공성 매질, 유리벽을 나타내고, ϕ 는 부피분율 (volume fraction)로서 예비실험을 통하여 측정하였다.

상기 기본방정식 (1)~(3)의 해석적인 해는 비선형 연립 편미분방정식을 풀어야하는 어려움으로 인하여 본 연구에서는 유한차분법을 사용하여 컴퓨터를 이용한 수치모사를 수행하였는데 수치모사의 과정, 해법 및 경계조건은 이미 발표된 논문 [7, 11]과 문헌 [15, 19]에 소개되어 있다.

3. 실험

3-1. 장치 및 방법

실험장치는 다공층, 가열부, 냉각부, 온도측정부로 나누어지는데 다공층은 두께 5 mm의 판유리로 제작된 안쪽치수 30 cm×30 cm×2 cm의 상자내에 높이 15 cm까지 평균직경 3 mm의 유리구슬 (Soda lime)과 증류수를 채워 구성함으로써 L/H비는 2가 되었다.

다공층의 밑바닥은 일정한 온도로 가열하기 위하여 3 mm두께의 동판으로 만들고 순환 가열수조를 제작하여 부착하였으며, 상층면은 온도를 일정하게 유지하기 위하여 냉각장치가 필요하므로 동판 순환 시스템을 사용하였다. 다공층의 상층면은 투수성이므로 유동에 방해될 주지 않도록 다공층 상부에 증류수를 다시 채우고 동판을 장치함으로써 냉각수는 동판내로만 순환되게 하였다.

실험에서 온도측정에 이용되는 열전대 (thermocouple)들은 Copper Constantan을 사용하였으며, 유동에 가급적 방해될 주지 않도록 유리벽면에 구멍을 뚫어 내벽에 설치하였는데 바닥과 상층면을 포함 모두 34개 위치에 열전대를 부착시켰다. 장치가 완성된 후 모든 점의 온도를 측정하여 동일한가

를 확인하고, thermostat로 가열수조의 수온을 원하는 온도까지 올린 다음 순환시키면서 바닥과 상층면의 온도를 각각 일정하게 유지시켰다. 실험은 먼저 무차원 전열계수를 구하기 위하여 임계 Rayleigh 수를 넘지 않는 전도열전달 상태에서의 실험들을 행하고 정상상태에서의 온도를 측정하여 등온선들을 구하였다.

전도열전달 상태에서의 실험이 끝나면 바닥의 온도를 증가시키면서 즉 Rayleigh수를 증가시키면서 정상상태의 대류유동이 될 때까지 일정시간 간격으로 온도를 측정하였다. 정상상태에 도달하면 유동가시화를 위하여 예측되는 유동셀의 수에 따라 추적 염료를 떨어뜨린 다음 이들 염료의 운동을 추적하고 사진을 찍었는데 추적염료로는 확산계수가 $1.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 대단히 작고 색상이 선명한 KMnO_4 를 사용하였다.

이상의 실험을 온도차를 변화시키면서 계속하면 측정된 온도 분포와 염료의 궤적으로부터 다공성 매질내 유체의 전열 및 유동에 관한 자료, 즉 등온선, 열플럭스, streak line, 유선 (streamline), 유동셀의 수 등을 Rayleigh수의 함수로 구할 수 있게 된다.

3-2. 물성측정

다공층의 중요한 물성들로서는 다공도 (porosity)와 투수율 (permeability)이 있는데 이들은 매질에 따라 다르므로 예비실험을 통하여 측정하였다. 다공도는 자연대류 실험에 사용한 유리상자내에서 직접 측정하였는데 기포의 생성을 방지하기 위하여 먼저 증류수를 붓고 유리구슬을 채운 다음 부피변화를 이용하여 측정한 결과 자유충전 (loose packing) 상태에서 $\phi_f / (\phi_f + \phi_s)$ 가 0.37이었다.

투수율은 처음 Carman-Kozeny의 이론식 [17]

$$K = D_p^2 \phi^3 / 180 (1 - \phi)^2 \quad (8)$$

으로 계산한 값 $6.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 를 이용하여 수치모사와 실험결과를 비교하여 보니 실험결과와 Rayleigh 수가 50%정도 크게 나타났다. 이것은 Carman-Kozeny의 이론식이 균일한 구형입자를 원통형 용기에서 측정할 때 근사한 식이므로 두께가 얇은 본 실험 장치의 투수율보다 크게 계산된 것으로 추정되었다. 따라서 투수율을 실측하기로 하고 일반적인 투수율

Table 1. Physical properties of the materials used in the experiment.

Materials	Density kg/m ³	Thermal Conductivity W/m°C	Specific Heat J/kg°C	Viscosity Pa · s	Thermal Expansion Coefficient °C ⁻¹
Distilled Water	1.0×10^3	0.63	4180.	$\mu \left(\frac{T_{top} + T_{bot}}{2} \right)$	$\beta \left(\frac{T_{top} + T_{bot}}{2} \right)$
Glass Bead	2.23×10^3	1.03	900.	—	—
Glass Wall	2.50×10^3	0.796	752.4	—	—

측정장치[16]를 본 연구의 실험내용과 동일한 상자 형으로 제작 측정하였는 바, 입자충전상태와 기포의 존재여부에 따라 2×10^{-9} 부터 $4 \times 10^{-9} \text{m}^2$ 까지 분포되었다. 실험과 수치모사의 비교에서는 자연대류 유동상태에서 입자의 충전상태가 자유충전에 가깝다고 보고 실측치중 $4 \times 10^{-9} \text{m}^2$ 를 사용하였다.

다공층 구성에 사용된 증류수, 유리구슬, 유리벽의 기타 물성들은 Table 1에 수록되어 있는데 유리구슬(Soda lime)의 물성은 제조회사(서독, Superior)로부터 제공받았고, 벽면 판유리의 열적성질은 국립공업시험원에 측정을 의뢰하였다.

Table 1에서 증류수의 물성치는 실험 온도범위($12 \sim 42^\circ\text{C}$)에서 그 변화가 5% 미만이었으나, 점도와 열팽창계수는 변화가 심하므로 매 실험마다 상하면의 평균온도에서의 값을 문헌[18]에서 취하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 무차원 전열계수

실험은 우선 수치모사에 필요한 무차원 전열계수를 결정하기 위하여 실험조건을 대류유동이 일어나지 않는 전도열전달 상태, 즉 Rayleigh수가 임계 Rayleigh수를 넘지 않는 범위에 두고 행하였다. 이 경우 좌우 벽면은 단열되어 있고 층내에서는 전도에 의해서만 열전달이 일어나므로 수평방향의 온도는 모두 동일하며, 수직방향의 온도구배는 바닥에서부터 상층부로 갈수록 전후 유리면에서 주위 공기와의 열손실에 따른 영향으로 열플럭스가 감소하므로 비선형으로 나타난다. 한편 에너지식 (3)으로부터 정지상태 즉 전도열전달 상태의 온도분포 θ_s 는 직접 해를 구할 수 있는데 (9)식으로 표시된다.

$$\theta_s = \frac{\sinh(N - NZ)}{\sinh N} \quad (9)$$

이 식은 $\theta_{amb}=0$ 일때의 해로서 주위온도와 다공층의 윗면의 온도를 같게 유지해준 경우이다. 이러한 경우의 해석이 보다 용이하므로 본 실험에서는 상층면의 온도를 주위온도와 같게 유지하면서 실험을 수행하였다.

식 (9)에서 N을 매개변수로 하여 θ_s 를 Z에 대해 도시하면 Fig. 2의 실선들과 같이 되고, 본 실험 조건에서 측정한 온도값을 무차원화하여 표시하면 점선과 같이 되므로 이에 대응되는 무차원 전열계수는 $N=3.2$ 로 추정된다. 따라서 주위 공기와의 전열계수 h는 무차원 전열계수의 정의로부터 $5.8 \text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 이며, 이 결과로부터 유리벽에서의 전도열전달 저항과 유리벽면에서 주위 공기로의 대류저항을 비교하면, 유리의 열전도율은 $0.796 \text{W/m}^\circ\text{C}$ 이고,

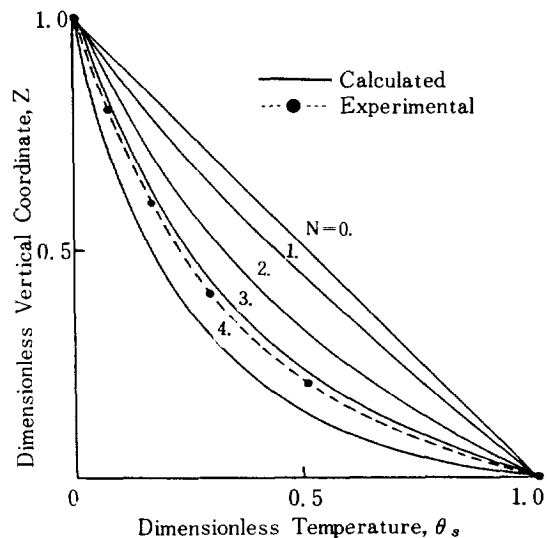


Fig. 2. Conduction-state vertical temperature profiles.

The dimensionless ambient temperature is $\theta_{amb}=0$.

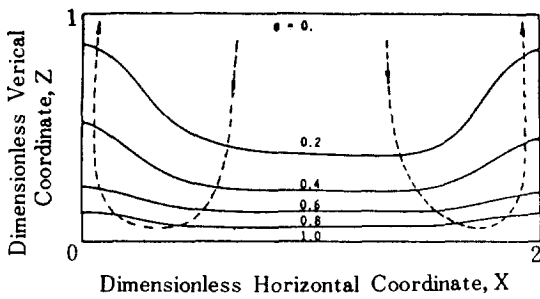


Fig. 3. Steady-state isotherms and streamlines for the case of two-cell convection at $Ra = 72$.

두께는 5 mm이므로 전도열저항이 대류열저항의 4% 미만임을 알 수 있다. 그러므로 벽면에서의 열손실을 핀이론으로 해석하는 것은 충분히 가능하다고 판정된다.

4-2. 실험 결과

다공층의 바닥과 윗면의 온도차를 점점 증가시키면 이미 언급한 전도열전달 상태를 지나 정상상태의 자연대류가 일어나는데 본 실험장치의 aspect ratio에 대해서는 단일셀 유동은 관찰되지 않고 이중셀 대류유동이 처음부터 관찰되었는 바, Fig. 3에 $Ra=72$ 인 경우를 도시하였다. 이러한 결과는 $L/H=2$, $N=3.2$, $\theta_{amb}=0$ 인 경우 최소 임계 Rayleigh 수를 갖는 유동셀의 수가 1이 아니고 2라는 Suh [7]의 안정성 해석 결과와 잘 일치하고 있다. 이 그림에서 실선들은 등온선으로서 열전대를 이용 측정한 각 점의 온도들로부터 구한 것이며, 유체의 유선을 나타내는 점선들은 등온선으로부터 유추할 수도 있으나 정확성을 기하기 위하여 유동가시화 실험으로 구한 것이다.

본 연구에서는 유동가시화를 위하여 확산계수가 대단히 작고, 분명한 색을 나타내는 과망간산칼륨($KMnO_4$)을 염료로 사용하였음에도 불구하고 정상상태까지는 12~24시간 정도의 오랜 시간이 소요되므로 초기상태부터 염료를 투입할 수는 없었다. 따라서 정상상태에 도달한 다음 구해진 등온선으로부터 유동셀의 수와 위치를 확인하고 그 위치에 염료를 투입하였다. 이와 같이 투입된 염료가 다시 표면에 도달하기 까지는 한 시간 이상이 걸리므로 용해되는 폭이 상당히 넓어졌으나 유동가시화에는 큰

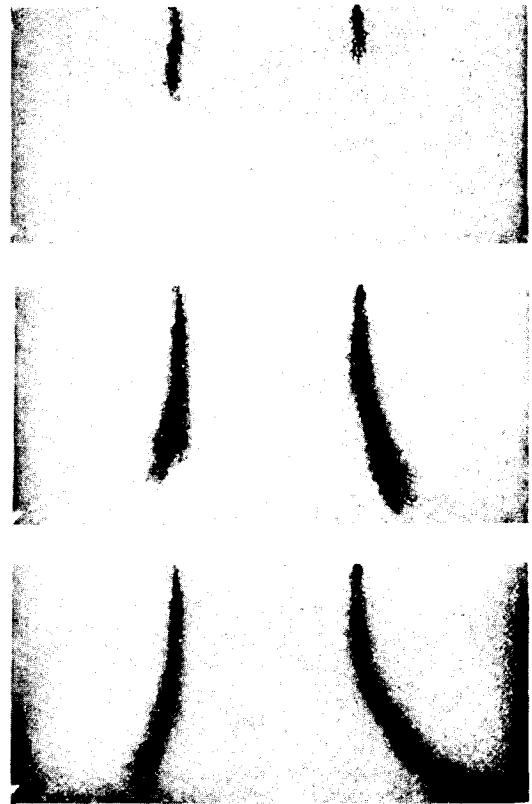


Fig. 4. Dye streaks for the case of steady two-cell convection at $Ra=72$. (tracer= $KMnO_4$)

지장이 없는 것으로 판단되었다. Fig. 4는 Fig. 3에 소개된 $Ra=72$ 에서의 정상상태 이중셀 유동에 대한 유동가시화 결과들을 사진으로 나타낸 것으로서 유체의 유동과정을 잘 보여주고 있으며, 이들 streak line으로부터 유선과 등온선이 대칭을 비교적 잘 유

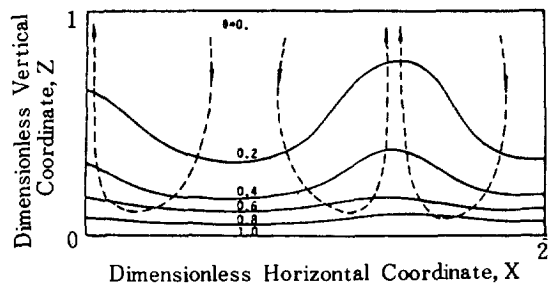


Fig. 5. Steady-state isotherms and streamlines for the case of three-cell convection at $Ra = 110$.

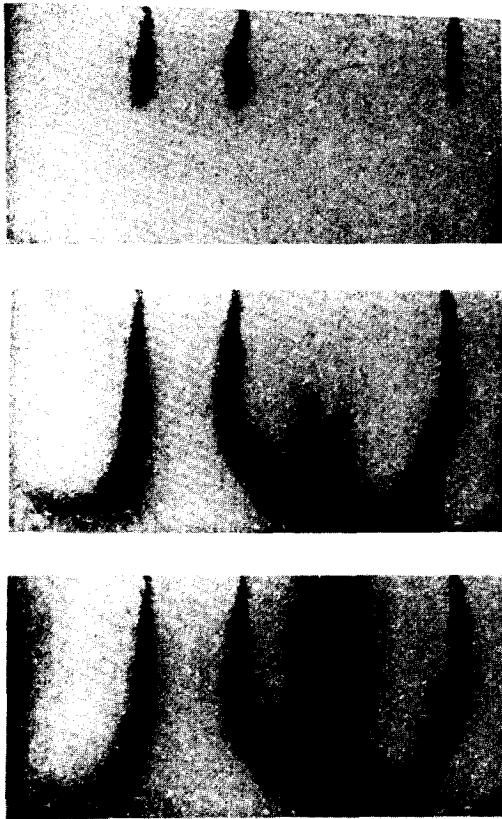


Fig. 6. Dye streaks for the case of steady three-cell convection at $Ra=110$. (tracer = $KMnO_4$)

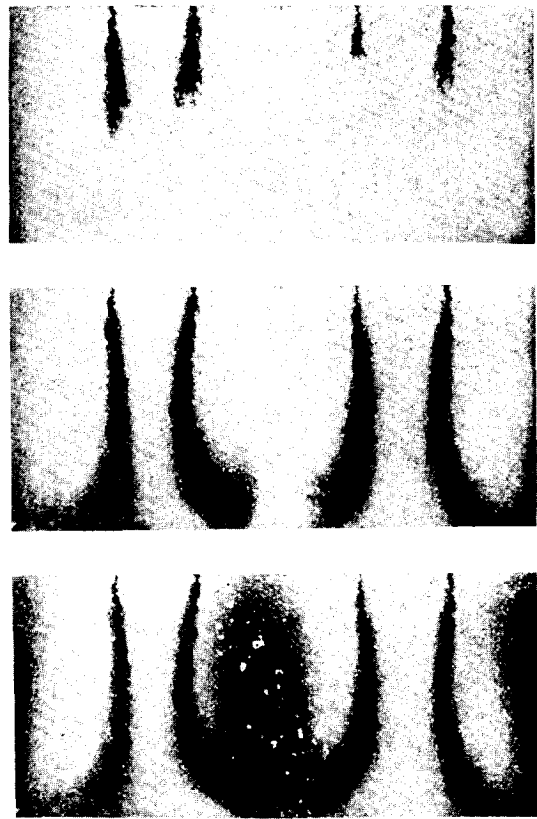


Fig. 8. Dye streaks for the case of steady four-cell convection at $Ra=155$. (tracer = $KMnO_4$)

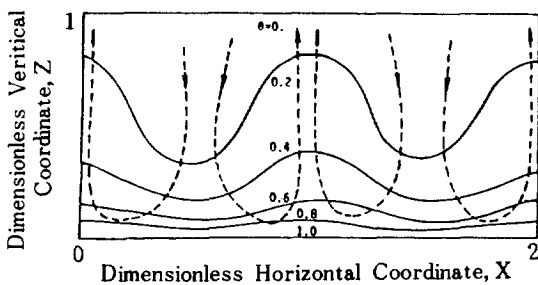


Fig. 7. Steady-state isotherms and streamlines for the case of four-cell convection at $Ra=155$.

지하고 있음을 확인할 수 있었다.

이와 같이 이중셀 유동을 보여주던 다공층에 온도차를 계속 증가시켜 주면 삼중셀 및 사중셀 유동으로 자연대류의 형태가 전이되어 가는 것을 관찰

할 수 있었는데 Fig. 5와 Fig. 6은 삼중셀 유동을, Fig. 7과 Fig. 8은 사중셀 유동을 보여주는 대표적인 실험결과이다.

4-3. 수치모사와의 비교

실험과 이론 연구의 결과들을 비교하기 위하여 무차원 전열계수 N 을 변화시키면서 가능한 유동셀에 관한 수치모사를 수행하였는데, Fig. 9에 이들을 종합하여 Nusselt수와 Rayleigh수의 관계로 도시하였다. 다공층 내에서의 자연대류에 대한 해석에서는 전도와 대류를 모두 포함한 전체 열플럭스를 정지상태 즉 전도열전달만이 존재하는 상태의 열플럭스로 나눈 값을 Nusselt수로 정의하여 사용하는 것이 일반적이다. 따라서 $Nu=1$ 이면 자연대류가 일어나기 전 전도열전달만이 존재하는 상태를 의미

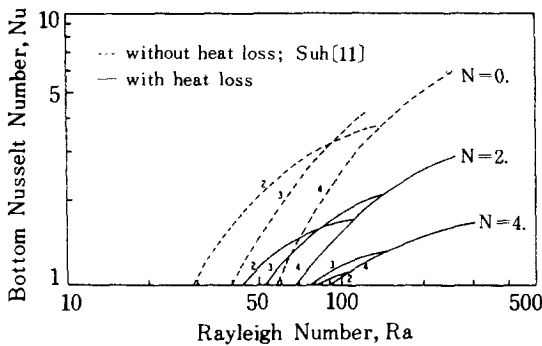


Fig. 9. Bottom Nusselt number vs. Rayleigh number for $N=0$, $N=2$ and $N=4$. The integers refer to the number of cells.

한다.

벽면에서의 열손실이 없는 경우에는 전도열전달에서의 수직 온도구배가 일정하고, 대류상태에서도 각 수평층에서의 평균 열플럭스들이 동일하므로 Nusselt 수는 바닥이나 윗면에서 변함이 없다. 그러나 본 연구에서와 같이 벽면에서의 열손실이 있는 경우에는 각 수평층의 열플럭스가 서로 다르므로 Fig. 9에 바닥에서의 평균 Nusselt 수

$$(Nu=2 \int_0^1 \frac{\partial \theta}{\partial z} \bigg|_{z=0} dx \bigg/ \frac{d\theta_s}{dz} \bigg|_{z=0}) \text{를 도출하였다.}$$

그림에서 $N=0$ 인 경우는 주위로 부터의 열교환이 없는 상태, 즉 벽면이 모두 단열되어 있는 상태로 Suh[11]의 연구결과이며, $N=2, 0, 4.0$ 들은 주위와의 열교환이 있는 경우이다. Fig. 9는 $\theta_{amb}=0$ 로 다공층의 온도가 항상 주위온도보다 높으므로 N 이 증가함에 따라 열손실이 커져 Nusselt 수가 감소하며, 전반적으로 자연대류효과가 작아져 열적으로 안정하기 때문에 임계 Rayleigh 수들이 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히 $N=4.0$ 정도가 되면 최소 임계 Rayleigh 수를 갖는 유동의 셀수가 2에서 3으로 변환됨을 알 수 있으며 이는 Suh[7]의 안정성 해석 결과와 일치한다.

Fig. 10은 본 실험의 결과와 수치모사 결과를 비교하기 위하여 $N=3.2$, $\theta_{amb}=0$ 으로 두고 해석한 결과를 자유충전 투수율을 이용한 실험결과와 함께 도출한 것이다. 그림에서 곡선의 모양을 관찰해 볼때 이론과 실험결과는 정성적으로 거의 일치하며, 정량적으로는 실험오차의 범위내에서 잘 부합된다

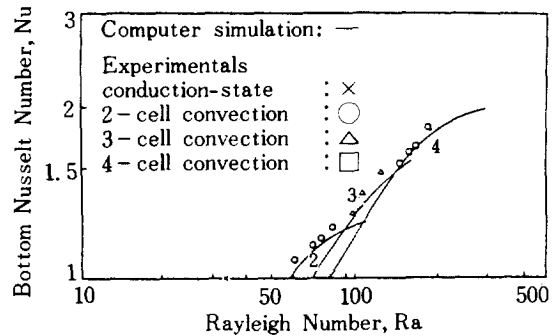


Fig. 10. Bottom Nusselt number vs. Rayleigh number for $N=3.2$.

The integers refer to the number of cells.

고 할 수 있다.

실험결과에서 한가지 주목할 점은 이론에서는 임의의 Rayleigh 수에서 여러가지 유동셀이 존재할 수 있으나 자연현상으로는 열플럭스를 극대화하는 방향으로만 자연대류가 일어남을 관찰할 수 있었다는 점이다. 예를 들면 $Ra=95$ 일때 수치모사에서는 2, 3, 4 중셀이 나타나지만 실험에서는 Nusselt 수가 제일 큰 삼중셀만이 나타나고 있다. 이러한 사실은 앞으로의 이론연구에 중요한 지식이 될 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 다공성 매질내 유체의 자연대류에 대한 유동 및 전열현상을 이해하기 위하여 유동가시화에 의한 실험과 수치모사를 통한 이론적 연구를 수행하였는바 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 염료를 이용한 유동가시화 실험은 정상상태 자연대류 유동의 유동장과 존재하는 셀수의 확인에 효과적이었으며, 유동가시화를 위한 얇은 상자형 다공층에서 주위 공기로의 열손실은 핀이론으로 적절히 모형화 할 수 있었다.
2. 임의의 Rayleigh 수에서 수치모사에서는 수학적으로 여러가지 유동셀이 가능하지만, 실험에서는 최대 Nusselt 수를 갖는 유동셀만이 존재한다는 것을 확인할 수 있었다.
3. 실험을 통한 임계 Rayleigh 수의 측정, Nusselt 수와 Rayleigh 수간의 함수관계, 대류유동셀의 변화

거동등의 관찰 결과는 이론적 해석과 정성적 및 정량적 비교가 가능하였으며, 이는 실험과 이론연구의 상호 보완에 상당히 기여할 것으로 기대된다.

감 사

본 연구의 수행에 연구비를 지원해준 한국과학재단에 감사드립니다.

NOMENCLATURE

- C_p : specific heat, J/kg °C
 D_p : particle diameter, m
 g : gravitational acceleration, m/s²
 H : height of the porous medium, m
 h : heat transfer coefficient, W/m² °C
 K : permeability of the porous medium, m²
 k : thermal conductivity, W/m °C
 L : length of the porous medium, m
 N : dimensionless heat transfer coefficient
 Nu : Nusselt number
 p : dimensionless pressure
 Ra : Rayleigh number
 T : temperature, °C
 v : dimensionless Darcy velocity vector
 X : dimensionless horizontal coordinate
 Z : dimensionless vertical coordinate

Greek Letters

- β : volumetric thermal expansion coefficient, °C⁻¹
 δ_p : half thickness of the porous medium, m
 δ_T : half thickness of the box, m
 θ : dimensionless temperature
 θ_s : dimensionless temperature at rest state (pure conduction state)
 μ : viscosity, Pa·s
 ν : kinematic viscosity, m²/s
 ρ : density, kg/m³
 τ : dimensionless time
 ϕ : porosity, volume fraction

Subscripts

- amb : refers to the ambient boundary
 bot : refers to the bottom boundary

- eq : refers to the equivalent quantity
 f : refers to the fluid
 gl : refers to the glass wall
 s : refers to the solid bead
 top : refers to the top boundary
 o : refers to the reference state

REFERENCES

- Horton, C.W. and Rogers, F.T.: J. Appl. Phys., **16**, 367 (1945).
- Lapwood, E.R.: Proc. Camb. Phil. Soc., **44** 508 (1948).
- Beck, J.L.: Phys. Fluids, **15**, 1377 (1972).
- Bau, H.H. and Torrance, K.E.: ibid, **24**, 382 (1981).
- Tewari, P.K. and Torrance, K.E.: ibid, **24**, 981 (1981).
- Ribando, R.J. and Torrance, K.E.: J. Heat Transfer, **95**, 42 (1976).
- Suh, M.H.: J. KICChE, **21**, 79 (1983).
- Palm, E., Weber, J.W. and Kvernfold, O.: J. Fluid Mech., **54**, 153 (1972).
- Straus, J.M.: ibid, **64**, 51 (1974).
- Holst, P.H. and Aziz, K.: Int. J. Heat Mass Transfer, **15**, 73 (1972).
- Suh, M.H.: J. KICChE, **20**, 377 (1982).
- Horne, R.N.: J. Fluid Mech., **92**, 751 (1979).
- Straus, J.M. and Schubert, G.: ibid, **87**, 385 (1978).
- Straus, J.M. and Schubert, G.: ibid, **91**, 155 (1979).
- Patankar, S.V.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, New York, N.Y.(1980).
- Bear, J.: "Dynamics of Fluids in Porous Media", American Elsevier, New York, N.Y. (1972).
- Dullien, F.A.L.: "Porous Media Fluid Transport and Pore Structure", Academic Press, New York, N.Y. (1979).
- Weast, R.C. and Astle, M.J.: "CRC Handbook of Chemistry and Physics", CRC Press, Boca Raton, Fla. (1981).
- Cheng, P.: Adv. Heat Transfer, **14**, 1 (1978).