

수평다공성 유체층에서 대류발생 시점에 관한 물질전달 실험
 송항옥(학), 윤도영(정), 신승일(학)
 광운대학교 공과대학 화학공학과

Experiments on the Onset of Convective Mass Transfer
 in a Horizontal Porous Layer

H.-O. Song, D.-Y. Yoon and S.-I. Shin
 Department of Chemical Engineering
 Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

서론

열 또는 물질전달이 수반되는 중력장하의 유체층에서는 밀도변화가 생기게 되는데, 밀도차가 어느 임계점에 이르게 되면 부력에 의한 자연대류가 발생하게 된다. 다공성 매질에 유체를 포화시킨 다공성 유체층에서의 자연대류는 Benard-Rayleigh 문제의 일환으로 간주할 수 있는데, 자연대류의 임계조건으로 Lapwood [1]는 Darcy-Rayleigh 수가 $4\pi^2$ 이상일 경우 자연대류가 발생하게 된다는 것을 보고하였다. 급격한 가열하에서 온도분포가 비선형일때, Elder[2]는 실험을 통해 자연대류 임계시점이 Darcy-Rayleigh수의 -2승에 비례함을 보였으며, Kaviany [3]는 임계시간을 증폭이론으로, 윤과 최[4]는 전파이론을 통해 임계시점을 예측한바 있다. 전파이론에 의한 예측된 자연대류 발생시점은 다음과 같다.

$$t_c = 165Ra_D^{-2}$$

여기서 t_c 와 Ra_D 는 무차원 자연대류 발생시점과, Darcy-Rayleigh 수를 각각 나타낸다. 이와 같은 연구들은 다공성 매질의 투과도가 작고, 유속이 작아 유속이 압력차와 선형의 관계를 보이는 Darcy 영역에 국한된다. 반면에 실제계에서는 투과도가 크거나 외력이 큰 경우가 많다. 이때는 유동방정식으로 Darcy 법칙에서 벗어나 관성의 영향을 고려한 비선형식인 Forchheimer[5]식이 적절하다. Darcy영역에서는 물질전달수인 Nusselt 수가 Darcy-Rayleigh수의 1승에 비례하는데 반해, Darcy-Rayleigh수가 매우 큰 영역에서는 Karman-Cozeny수의 영향을 고려해 Nusselt수는 Ra_D 의 1/2승에 비례하는 것으로 Bejan[6] 등에 의해 보고되었다.

본 연구에서는 전기화학기법을 도입하여 이와 같이 간단하지 않은 다공성매질에서의 자연대류 발생조건을 규명하고자 한다. 이는 이론적 발전에 비해 아직까지 미흡한 다공성 매질에서의 실험적자료를 제공함은 물론, 난류해석이라는 이론적 대과제에 한걸음 다가설 수 있는 토대를 마련하는데 있어서 중요한 역할을 할 것으로 생각된다. 특히, 다공성 유체층에서 발생하는 자연대류의 발생조건을 규명하고자 하는 본 연구는 지열의 이용, 석유채취, 곡물의 저장, 함수물의 건조, 시멘트벽의 건조, 원자로 냉각, 충전탑에서의 물질전달등과 더불어 고순도, 미세화를 추구하는 경향에 비추어 산업현장에서 대류전달특성을 이해하고 활용하는

데 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

기본계

본 연구에서 적용될 계는 투과도가 K 공극률이 ε 이며, 깊이가 L 인 수평다공성 유체층이다. 이때 적용되는 운동량 지배방정식은 다음과 같다.

$$\vec{u} + \frac{bK}{\nu} |\vec{u}| \vec{u} = \frac{K}{\mu} (-\nabla p + \rho \vec{g}) \quad : \text{Forchheimer 식}$$

여기서 \vec{u} , p , μ , ν , ρ 와 b 는 각각 속도벡터, 압력, 점도, 동점도, 유체의 밀도와 관성계수를 나타낸다. 수평다공성 유체층에서는 Darcy-Rayleigh 수가 $4\pi^2$ 인 조건으로 농도차가 주어지는 경우에는 항상 자연대류가 발생하게 된다. 이때, 물질전달 계에서 다공성 매질의 특성 및 추진력들의 크기를 가늠해주는 주요 무차원 수들은 다음과 같다.

$$Ra_D = \frac{KgL}{D\nu} \frac{\rho_b - \rho_s}{\rho_b} \quad : \text{Darcy - Rayleigh no.}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad : \text{Schmidt no.}, \quad Sh = \frac{kL}{D} \quad : \text{Sherwood no.}$$

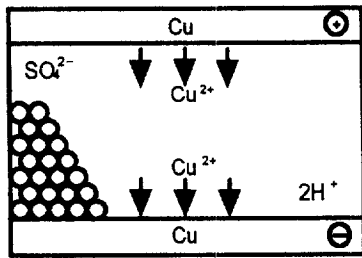
$$Da = \frac{K}{L^2} \quad : \text{Darcy no.}, \quad KC = \frac{1}{bL} \quad : \text{Karman - Cozeny no.}$$

여기서 D 는 유효물질확산도, k 는 대류물질전달계수를 각각 나타낸다.

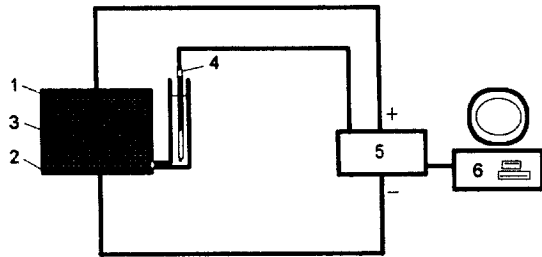
실험

본 실험은 물질전달 측정과 환산이 편리하며, 보편적인 한계전류를 이용한 전기화학기법을 도입해서 수행되었다.[7] 실험에서는 구리이온들의 전기영동을 억제시키기 위해 황산수용액을 비활성 전해용액으로 사용했으며, 따라서 확산과 대류만으로 전기도금계의 물질전달이 이루어지도록 했다. 설치된 전극에 전위차를 부여하면 전해용액을 통해 전류가 흐르게 되며 산화·환원 반응에 의해 음극표면에 구리이온들이 석출되어 도금이 이루어지게 된다. 한계전류 상황에서는 전위차의 증가에도 더이상 전류의 상승이 없다. 이때에는 모액의 농도가 일정하여 전극면의 구리이온들의 농도는 0에 가깝게 된다. 따라서 한계전류하에서는 물질전달속도가 최대로 이루어지는 것으로 간주된다. 본실험에서 사용된 황산구리, 황산 수용액의 물성치들은 Fenech와 Tobias[8]에 의해 얻어진 떡급수 형태를 사용하였다. 실험장치는 그림1에 나타나 있다. 전극간의 거리는 2, 3, 4, 5, 6cm, 전극면적은 25, 36cm², 그리고 다공성 매질로 직경 0.3957, 0.6982cm의 유리구슬을 사용했으며 황산구리의 농도를 0.02~0.5몰로 변화시키면서 실험을 반복했다. 비교전압 측정을 위한 기준전극으로는 Caromel 전극을 그리고 전원공급과 한계전류 측정을 위해 Potentiostat (EG&G Parc., Model 263A)를 사용했다. 두 수평전극면에 대하여, 양극또는 음극을 조절하면, 상부면 혹은 하부면에 구리이온이 도금되어진다. 각 경우는 확산만에 의하여 혹은 확산과 대류에 의하여 도금되어진다.

양극면간의 일정전위차에 대하여, 확산만에 의한 도금의 경우에 비하여, 확산과 대류에 의한 도금의 경우에 있어서 물질전달량으로 간주되는 전류의 양이 증가되는데 이때의 시점과 전류량들이 자연대류의 발생조건을 결정하는데 있어서 중요한 역할을 하게 된다. 따라서, 확산만에 비하여 전달량이 확연히증가하는 시점(undershoot time) 과 그때의 전류량을 측정하여 대류발생시점과 물질전달량으로 결정하였다.



Schematic diagram of the cell



1. Anode
2. Cathode
3. Electrolyte & Porous media
4. Reference electrode
5. Potentiostat
6. Controller & Recorder
Experimental circuit

그림1. 실험장치도.

결과 및 고찰

본 실험에서는 다공성 매질이 포화된 유체층에서 전기도금을 통한 물질전달 실험을 행하여 자연대류 임계시간과 Darcy-Rayleigh, Karman-Cozeny 그리고 Schmidt 수와의 관계에 대한 실험식을 구성하였다. Schmidt수가 $3000 < Sc < 5000$ 이고, Darcy-Rayleigh 수가 $10^4 < Ra_D < 10^6$ 인 영역에서 가시화 대류발생시점은 $t_c = 337.909(Ra_D/Y)^{-0.676}$ 의 실험 결과식을 얻었다. 여기서 $Y = Da/PrKC$ 이다. 이 결과는 윤과 Elder 등이 이론과 실험에서 제시한 Ra_D 의 -2승에 비례하는 결과와는 서로 다르다. 이는 본 실험의 영역이 Darcy 영역이 아닌 Forchheimer 영역인 것으로 생각되며, 이 경우 발생시점은 Ra_D 의 -1승에 비례하므로, 본 실험의 결과는 이에 많이 근접해 있다. 위 영역에서 물질전달량

을 나타내는 Sherwood 수는 Darcy-Rayleigh 수, Karman-Cozeny 수, 그리고 유체 특성수인 Schmidt 수로서 구성되는데, 본 실험의 결과로서 $Sh = 0.003090(Ra_D/Y)^{0.4117}$ 의 실험상관식을 얻었다. 이는 $Sh = c^*(Ra_D/Y)^{1/2}$ 의 형태인 Forchheimer 의 모델에서의 식에 많이 근접해 있음을 짐작할수 있다. 따라서 Darcy-Rayleigh 수가 큰 영역에서는 Darcy법칙에서 벗어나 외력과 관성의 영향을 고려한 Forchheimer유동을 따른다는 것을 다시 한번 확인해 주며, 이에 따른 이론적인 새로운 상관식의 도출이 요구된다.

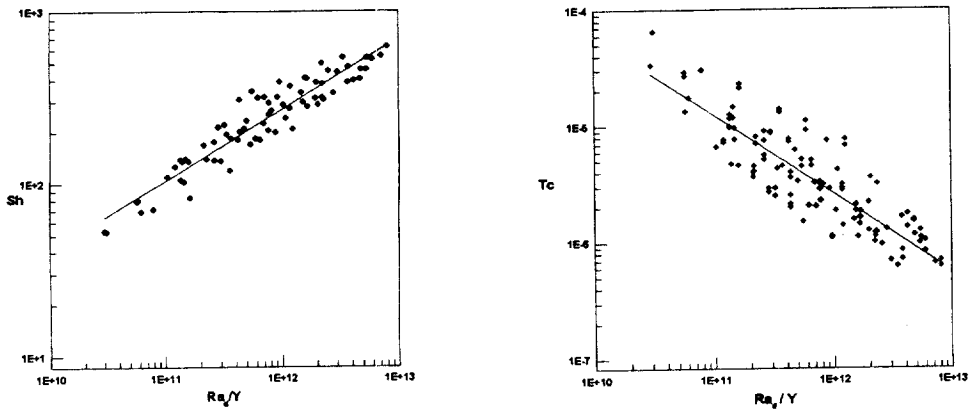


그림 2. 자연대류발생시점과 물질전달량.

참고문헌

- 1) Lapwood, E.R., *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **44**, 508(1948).
- 2) Elder, J.W., *J. Fluid Mech.*, **27**, 609(1967).
- 3) Kaviany, M., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **27**, 2101(1984).
- 4) Yoon, D.Y. & Choi, C.K., *Korean J. Chem. Eng.*, **6**, 144(1989).
- 5) Forchheimer, P.H., *Z. ver. Dtsch. Ing.*, **45**, 1782(1901).
- 6) Bejan, A., *Proc. 2nd ASME-JSME Thermal Eng. Conf.*, pp. 22-27 (1987).
- 7) Levich, V. G., *Acta Physicochim. URSS*, **17**, 252(1942).
- 8) Tobias, C.W., Eisenberg, M.A. & Wilke, C.R., *J. Electrochem. Soc.*, **99**, 359(1952).