

〈論 文〉

고 다공성 물질에서 열 및 물질전달

이 금 배*

(1990년 3월 24일 접수)

Heat and Mass Transfer in Highly Porous Media

Kum-Bae Lee

Key Words: Porous Media(다공성 물질), Flat Plate(평판), Radiation(복사), Heat/Mass Analogy(열/물질 유사점), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌 승화법)

Abstract

The heat transfer coefficients were calculated numerically to see the effects of radiation around the porous medium put on the flat plate at a distance from the leading edge of flat plate for the two-dimensional laminar flows. To verify the analytical model developed and invoke the heat/mass transfer analogy, an experiment was carried out using naphthalene sublimation technique. From the effects of the wake, Sherwood number is maximum around the region where the porous medium is attached. The theoretical results correspond well with the experimental results at small Darcy number. Permeability of ceramic blocks used for experiment was also measured and the Forchheimer equation is applicable in our measurement range.

기 호 설 명

b : 후방산란 부분인자
 C : 농도
 D : 질량 확산계수
 Da : Darcy 수, K/H^2
 e_b : 흑체 방출능, σT^4
 F : 변수
 H : 다공질체 높이
 h_m : 대류질량 전달계수
 K : 다공질체의 침투율
 k : 열전도도
 l : 상류 길이
 m : 질량전달률
 N : 대류-복사유속 변수
 Nu : Nusselt 수

p : 압력
 p_{nw} : 벽에서 나프탈렌 증기압력
 Pe : Peclet 수
 Pr : Prandtl 수
 Q : 무차원 복사량, $q/\sigma T_\infty^4$
 q : 복사량
 \bar{R} : 보편가스상수
 Re : Reynolds 수, $u_\infty H/\nu$
 Sc : Schmidt 수, ν/D
 Sh : Sherwood 수
 T : 온도
 u, v : x 와 y 방향 속도
 x, y : x 와 y 좌표
 ϵ : 다공성
 μ : 동적점성
 ρ : 유체 밀도, 또는 나프탈렌 증기밀도
 σ_a : 흡수계수

σ_e : 흡광계수
 σ_s : 산란계수
 τ : 광학두께

하 첨 자

e : 유효
 f : 유체
 i, j : 텐서포시
 m : 질량전달
 n : Nusselt 수의 함수
 p : 다공질
 r : 복사
 s : 원천, 또는 Sherwood 수의 함수
 w : 벽
 ∞ : 자유유동

상 첨 자

+, - : 양 및 음의 y 방향
 * : 무차원

1. 서 론

다공성 물질내에서 열 및 물질전달의 특성을 이해하는 것은 과학이나 공학분야로의 응용을 위해 매우 중요하다. 유체의 일부는 다공성 물질내로 또 그 일부는 주위로 흘러가는 많은 실질적인 유동현상을 관찰할 수 있다. 지구표면위에 있는 나무, 작물등 장애물 주위로 흐르는 유동, 고 다공성 전열체 위로 흐르는 유동, 산업체의 건조 및 냉각공정 등에서의 유동등 그 예를 많이 찾아볼 수 있다.

몇몇 이들은 모형 숲의 내부 및 상부로 흐르는 바람의 거동에 대한 연구를 행하였으며^(1,2); 그 밖에 풍동측정을 위해 숲이나 농작물등을 모형화한 연구도 행해졌다^(3,4).

강제 대류유동에서 입자 또는 기공(pore)의 크기를 기준한 Reynolds 수가 1보다 큰 경우에는 다공성에 의한 관성효과를 고려하기 위해 속도제곱의 항($|U|u_i$)이 추가되었으며⁽⁵⁾, 더 빠른 유동에 대해서는 많은 사람들이 대류 관성항($u_j \partial u_i / \partial x_j$), 다공성 관성항($|U|u_i$, 또는 점성항($\mu_c \partial^2 u_i / \partial x_j^2$)들을 추가하여 Darcy의 법칙을 변형시켜왔다⁽⁶⁾. 위의 세항을 추가한 식은 침투율(permeability) K 가 감소하면 방정식은 다공성 물질의 이론(Darcy의 법칙)에 접근하며, K 가 증가하면 Navier-Stokes 방정식에 접근하게 된다. 따라서 이러한 해석은 두개

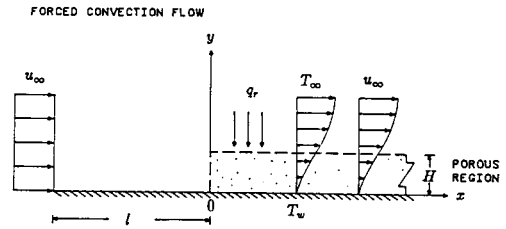


Fig. 1 Schematic of porous medium at system boundary with net radiation to the porous medium

의 이론을 결합하고 있다.

Fig. 1에서는 본 수치해석에서 사용된 이상화된 모델을 그림으로 보여주었고 있다. 이때 2차원 다공성 물질은 두 방향(x 와 y 방향)으로 무한히 확장되는 것으로 가정하였으며, 고 다공질체의 하부는 불투과성인 평면과 접해 있으며, 상부는 자유유동 영역에 노출되어 있다. 이때 유동은 이러한 2개 영역계의 선단에서 주어진다.

복사열전달 효과를 알아보기 위해 에너지 방정식을 수치적으로 풀었으며, 그 결과를 열전달계수 및 온도의 향으로 나타내었다. 수치 해석적 모델의 검증을 위해 여러사람들이 물질전달과정 해석을 위해 사용한 나프타린 승화법(naphthalene sublimation technique)^(7,8)을 이용하여 실험을 수행하였다. 또한 실험에 사용된 다공질체(ceramic blocks)의 침투율도 측정하였다.

실험을 통하여 다공질 영역에서 열전달 및 물질전달의 유사성이 입증된다면, 이곳에서 물질전달 실험으로 얻어진 Sherwood수는 바로 Nusselt수로 전환될 수 있다.

2. 이론해석

다공질체는 균질 등방성이라 간주하며, 이에 대한 보존 방정식들은 대상부피(control volume)을 이용한 다공질체 내에서 공탐(superficial, or Darcian)속도에 대한 항으로 유도될 바 있다⁽⁹⁾.

Porous Region

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\rho}{\epsilon^2} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{dp}{dx} - \frac{\mu}{K} u - \frac{\rho F}{\sqrt{K}} |U| u + \frac{\mu_c^2}{\epsilon} \nabla^2 u \tag{2}$$

$$\frac{\rho}{\epsilon^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{dp}{dy} - \frac{\mu}{K} v - \frac{\rho F}{\sqrt{K}} |U| v + \frac{\mu_e}{\epsilon} \nabla^2 v \quad (3)$$

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k_e \nabla^2 T - \nabla q_r \quad (4)$$

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D_e \nabla^2 C \quad (5)$$

where

$$|U| = (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$k_e = \epsilon k_f + (1 - \epsilon) k_p$$

$$D_e = \epsilon D$$

또한 유효점도 μ_e 에 대한 모델들이 요구되며, Brinkman의 전개에 의해 $\mu_e \approx \mu$ 해도 실험결과와 잘 일치됨이 밝혀진 바⁽¹⁰⁾ 있으므로, 본 연구에서는 이를 이용하였다. Ergun의 방정식⁽¹¹⁾에서 F 값은 $1.75/\sqrt{150\epsilon^3}$ 이 되므로 이를 이용하였다.

다공질체 외부영역에 대한 보존 방정식들은 다공질체 내부에 대한 식들에서 $\epsilon \rightarrow 1$ 와 $K \rightarrow \infty$ 로 취함으로써 쉽게 유도된다.

x 축방향의 온도구배는 y 축 방향의 그것에 비해 매우 작은것으로 가정한다. 즉 $q_r(x) \ll q_r(y)$. 따라서 복사유속은 1차원 근사에 의해 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$q_r(y) = q^+(y) - q^-(y) \quad (6)$$

Two-flux 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{dq^+}{dy} &= -2\sigma_a q^+ - 2\sigma_s b q^+ + 2\sigma_a e_b + 2\sigma_s b q^- \\ -\frac{dq^-}{dy} &= -2\sigma_a q^- - 2\sigma_s b q^- + 2\sigma_a e_b + 2\sigma_s b q^+ \end{aligned} \quad (8)$$

다공질체 외부에서 원천유속(source flux)는 일정한 것으로 가정하며, 다공질체 내에서의 복사전열을 표현하는 결합 상미분 방정식은 2개의 2차 미분 방정식으로 분리되며, 이 식들은 경계조건을 이용하여 변수 변분법(method of variation of parameters)에 의해 풀려진다.

무차원 보존 방정식, 경계조건, two-flux 해들은 지면제한 관계로 생략하였으며, 상세한 풀이 과정은 참고문헌 (9)에 기재되어 있다.

2.1 경계 조건

다공질체 상류($x = -l$)에서 속도 및 압력분포는 자유유동에서의 값들과 동일하여, 다공질체가 시작되는 지점 ($x=0$)에서 초기값으로 속도분포가 주

어져야 한다. 또한 충분히 먼 상류지점(속도분포가 평탄한)과 다공질체의 시작 지점사이에서의 거리 (l)가 명기되어야 한다. 따라서 초기값으로 다공질체 시작점($x=0$)에서의 u 속도 성분의 분포는 포물선 분포로 가정하였다. 이는 여기서 사용된 다공성이 매우 크기 때문이다.

u 속도 분포와 상류거리를 알면, v 속도 성분은 다공질체 시작점까지 직선적으로 증가하며, 다공질체 위에서 압력은 자유유동의 압력과 동일하다는 가정에 의해 결정된다. 온도는 속도와 유사한 분포를 가지며 농도는 쌍곡선 분포를 갖는 것으로 가정하였다.

평판표면($y=0$)에서의 미끄러짐(no slip)은 없는 것을 간주 하였으며, 평판표면에서 압력의 경계조건은 y 축 방향의 운동량 방정식으로 부터 결정되며, 평판표면에서의 온도 및 농도는 x 축에 따라 일정한 것으로 가정하였다.

y 값이 매우 클때($y \rightarrow \infty$) 경계층내의 물성치들은 자유유동내의 그것과 동일해지며, 다공질체 외부에서 압력은 자유유동의 압력과 동일한 것으로 가정하였다.

다공질체 시작점에서 충분히 먼 하류($x \rightarrow \infty$)쪽에 대한 경계조건은 더 이상의 변화가 없는 것으로 가정하였다. 즉 1차 미분항들이 0이 된다고 가정하였다.

다공질체과 유체의 경계면($y=H$)에서 공탐속도, 수직응력, 온도, 열유속, 농도 및 질량유속등은 연속성을 유지하여야 한다.

2.2 풀이방법

유한차분법을 이용하여 무차원 지배방정식들을 주어진 경계조건을 적용하여 풀었으며, 수치계산은 다공질체의 선단에서 시작하여 하류방향으로 수행하였다. 보존 방정식들은 Thomas 알고리즘을 이용하여 풀었으며, x 및 y 축 방향 운동량 방정식으로 부터 유도된 압력 방정식은 타원형(elliptic)이며, SOR법(successive overrelaxation method)을 이용하여 풀었다.

수정된 Nusselt수라 불리워지는 무차원변수 $Nu(x)$ 는 표면에서 일어나는 대류, 전도 열전달에 복사 열전달을 더한 양의 척도를 제공한다.

$$|Nu| = - \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} + \frac{Pe_e}{N} Q_r \Big|_{y^*=\infty} \quad (9)$$

Nusselt 수는 2개의 성분으로 구성된다. 즉, 위식

의 우변의 첫째항은 대류 및 전도를 합한것을 나타내며, 두번째 항은 열복사를 나타낸다.

또 다른 무차원 변수인 $Sh(x)$, 즉 Sherwood 수는 표면에서 일어나는 대류물질전달의 척도를 나타낸다.

$$|Sh| = \frac{h_m H}{D_e} = - \left. \frac{\partial C^*}{\partial y^*} \right|_{y^*=0} \quad (10)$$

2.3 결과

복사 열전달 효과를 알아보기 위해 에너지 방정식을 수치 해석적으로 풀었으며, 그 결과를 열전달 계수 및 온도의 향으로 나타내었다. Fig. 2부터 Fig. 5까지는 복사열전달 효과가 고려된 ($Q_s=0 \sim 3$) 열전달계수를 나타낸 것으로, 이때 조건은 $Re=500$, $Da=0.005$, $\epsilon=0.98$ 및 $\tau=1$ 이었다.

Fig. 2는 복사열전달이 없는 경우에 대류 열전달 계수만을 나타낸 것으로, 그 감소율은 x 축 방향을 따라 거의 일정하다. Fig. 3부터 Fig. 5는 대류, 복사, 대류와 복사를 합한(총열 전달 계수) 각각의 열전달 계수의 값들을 보여주고 있다. Fig. 3에서 초기에는 복사열전달의 효과로 총 열전달 계수가 증가하지만 $x/H=2$ 인 지점을 지나면 복사열전달이 여전히 일정해도 총 열전달 계수는 감소한다. 이는 대류항이 $x/H=2$ 인 지점을 지나면 x 축을 따라 감소하기 때문이며, 따라서 총 열전달 계수는 $x/H=2$ 부근에서 최대가 된다.

원천유속이 증가하면 Fig. 4 및 Fig. 5에서와 같이 총 열전달 계수는 증가하며, 유체의 관성력이 감소함에 따라 총열전달에 대한 복사열전달의 영향은 더욱 중요해짐이 명백하다. 그러나 원천유속이 계속 증가할지라도 대류열전달이 복사열전달보다는 크며, 이는 원천유속이 증가함에 따라 복사열전달의 영향으로 온도구배가 커지며, 따라서 대류열전달 계수도 증가하기 때문이다.

이러한 결과들로 부터 복사열전달이 없는 경우 열전달은 x 축 방향을 따라 계속 감소하며, 원천유속이 적은 경우에 x 값이 작은 범위에서 열전달은 증가후 다시 감소한다. 원천유속이 클 경우에는 하류쪽에서의 열전달 증가율은 작지만 보다 큰 원천강도로 부터의 복사흡수량이 증가하기 때문에 열전달은 x 축을 따라 계속 증가하게 된다.

Fig. 6에서는 원천유속이 $Q_s=3$ 일 때 온도는 x 축을 따라 계속 증가함을 나타내고 있는데 온도는 y/H 값이 y 축을 따라 0.85에 이를 때까지 계속

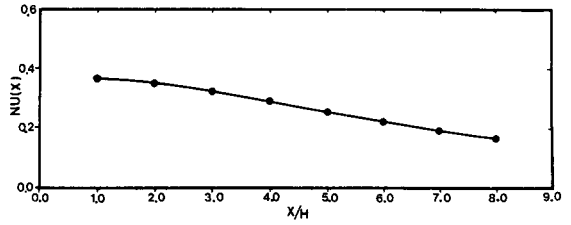


Fig. 2 Nusselt Number ($Q_s=0$)

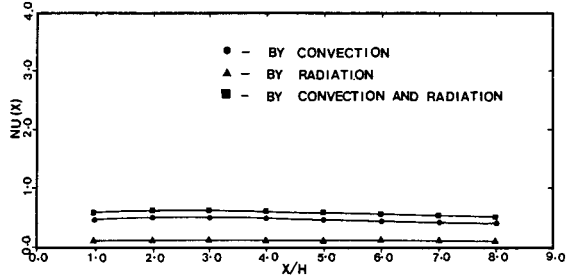


Fig. 3 Nusselt number ($Q_s=1$)

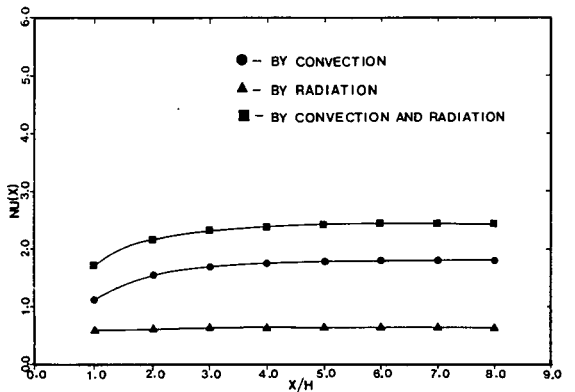


Fig. 4 Nusselt Number ($Q_s=2$)

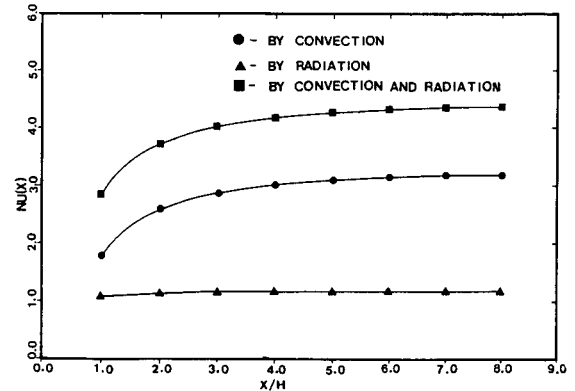


Fig. 5 Nusselt Number ($Q_s=3$)

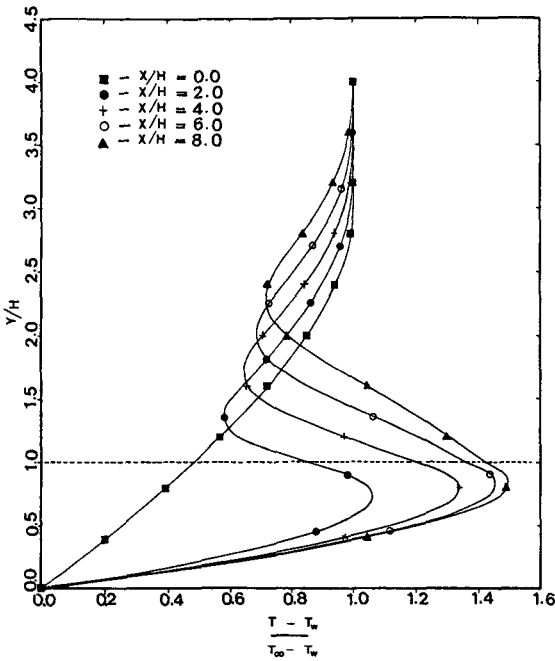


Fig. 6. Temperature profile ($Q_s=3$)

증가한다. 이 점을 지나면, 자유유동 영역의 영향과 경계면에서의 온도 구배는 거의 같다($\partial T^+/\partial y \approx \partial T^-/\partial y$)는 경계조건으로 인해 온도는 감소한다. $y/H=0.85$ 부근에서 형성되는 다공질체내의 최고온도는 $x/H=8$ 지점의 자유유동영역의 온도보다 1.5배 가량 높다.

3. 실험적 고찰

수치 해석적 모델의 검증을 위해 복사전달장을 무시할 수 있는 경우에 대해 나프탈린 승화법을 이용한 실험을 수행하였는데, 이는 다공질 매체등이 나프탈렌 평면으로 부터의 물질전달에 미치는 영향과 열 및 물질전달의 유사성을 고찰하기 위한 것이다.

3.1 실험방법 및 자료처리

Fig. 1에서 처럼 나프탈린 평판을 만들어 그 선단으로 부터 $l=6.5\text{cm}$ 떨어진 곳에 단단한 다공성 세라믹 블럭⁽¹²⁾($9.5 \times 20.0 \times 1.905$ or 1.11cm)을 위치시켰으며, 이 구조물을 관류형(once-through) 저속 풍동내에 설치하였다. 이때 구조물이 설치된 풍동내의 작업장(working area)의 크기는 $20 \times 61 \times$

20cm였다.

나프탈렌은 매끄러운 표면을 지닌 $15 \times 17\text{cm}$ 의 사각형판이며, $19 \times 19\text{cm}$ 의 정사각형에 강제 평판틀에 담겨져 있다. 매 실험마다 국부적인 물질전달 계수의 분포는 시험부를 통해 공기가 순환되기 전후에 나프탈렌 표면에 표시된 격자점의 높이를 측정하여 구하였으며, 나프탈렌 표면의 238개 격자점(너비방향 17개 \times 유동방향 14개)에 대한 높이를 측정하였다. 실험 수행중 공기는 항상 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지시켰으며, 공기의 온도는 주기적으로 측정기록하였다. 매 실험마다 2~3시간 정도 행해졌으며, 시계를 이용하여 실험시간을 기록하였다. 높이 측정중 자연대류의 영향을 고찰하기 위해 예비실험을 또한 실시하였다.

국부 물질전달계수는 각 측정점의 높이변화(Δy), 실험시간(Δt), 고체나프탈렌의 밀도(ρ_s), 평판표면에서의 나프탈렌 증기의 밀도(ρ_w)와 자유유동 영역에서의 나프탈렌 증기밀도(ρ_∞)의 차이등으로 결정된다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{(\rho_w - \rho_\infty)} = \frac{\rho_s \Delta y}{(\rho_w - \rho_\infty) \Delta t} \quad (11)$$

참고문헌 (13)으로 부터 나프탈렌의 물성치 $D=0.61 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$, $\rho_s=1145 \text{kg}/\text{m}^3$, $M=128.16 \text{kg}/\text{kmol}$ 등을 구할 수 있으며, 벽면에서 나프탈렌 증기밀도는 증기압-온도의 관계로 부터 계산되어진다⁽¹⁴⁾.

$$\rho_w = \frac{p_{nw} M}{RT_w} \quad (12)$$

where

$$\log_{10} p_{nw} = 11.884 - \frac{6713}{T_w}$$

자유유동 영역에서의 나프탈렌의 증기밀도는 0에 가까우며, 따라서 국부 물질전달계수 및 Sherwood수는

$$h_m = \frac{\rho_s \Delta y}{\rho_w \Delta t} \quad (13)$$

$$Sh_H = \frac{h_m H}{D} \quad (14)$$

3.2 침투율의 측정

다공성 물질의 침투율을 측정하기 위해 4개의 서로 다른 단단한 세라믹 블럭에 각각 유체를 강제로 흘려 압력강하 및 유량을 측정하였다⁽¹⁵⁾. 가장 단순한 형태인 Darcy의 법칙을 적용하면

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K} u \quad (15)$$

유량이 클 경우에는 Forchheimer식을 적용할 수 있다.

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K}u + \frac{\rho F}{\sqrt{K}}u^2 \quad (16)$$

윗 식은 다음과 같이 변형시킬 수 있다.

$$\frac{(dp/dx)}{u} = A + Bu \quad (17)$$

where $A = \frac{\mu}{K}$

$$B = \frac{\rho F}{\sqrt{K}}$$

각 샘플에 대해 15회 이상 측정하였으며, 유속의 범위는 0.02m/s에서 0.46m/s까지로 하여, 그 결과를 Table 1에 수록하였다. Fig. 7의 곡선맞추기식 (curve fitting eq.)은 $(dp/dx)/u$ 와 u 의 관계를 보여주는 것으로 역시 Table 1에 수치들이 자세히 수록되었다. 실험 자료를 직선으로 연결시키면, 침투율 K 및 상수 F 는 식 (17)로 부터 계산되어진다. Darcy의 법칙을 이용한다면 Fig. 7과 식 (15)로 부터 A 값은 상수가 되어야 하므로, 본 실험범위에서는 Darcy의 법칙은 적합하지 않음을 알 수 있다.

3.3 입력 변수

3개의 서로 다른 세라믹 블럭 (Table 1의 시편 II 및 IV)의 실험 및 이론 해석을 위해 이곳에서 사용되었으며, 입력변수들을 Table 2에 수록하였다. $x=0.065m$ 인 점(이론해석을 위한 다공질체 시작점)에서의 속도에 대한 경계층 두께는 다공질체의 높이와 같다고 가정하였으며, 다공질체 선단에서 Sherwood수는 실험을 통해 얻어진 Sherwood수와 동일하다고 가정하였다. 또한 실험측정길이는

평판선단에서 부터 0.15m이내이며, 이때 Reynolds 수는 층류유동의 조건을 나타내므로 층류유동에서의 운동량 및 질량방정식을 사용하였다.

그림에서 4개의 곡선을 사용하여 결과를 비교하였는데, 하나는 실험결과, 또 다른 하나는 이론해

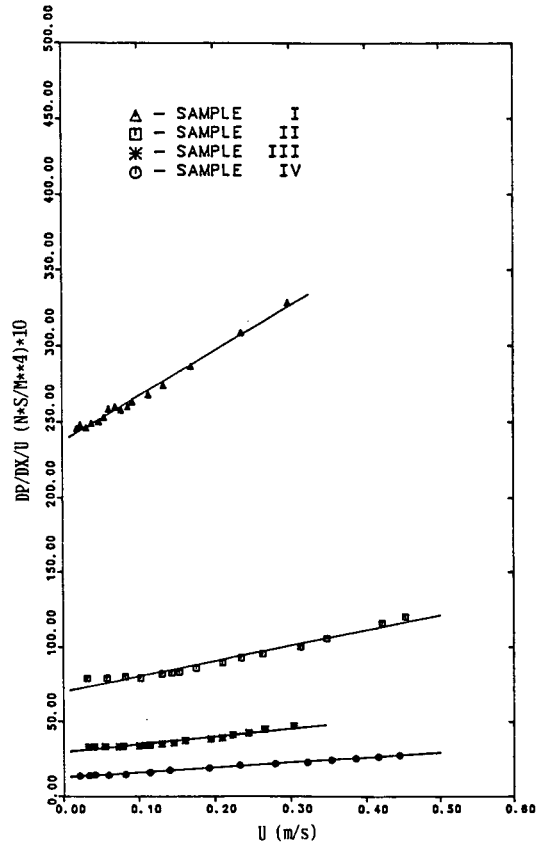


Fig. 7 Pressure drop through the porous media

Table 1 Experimental measurement of permeability

Sample	PPI*	Density (gm/cc)	Porosity** (%)	Velocity Range (m/s)	Pressure drop (N/m ³)	Fitting equation		Permeability K (m ²)	Constant F
						dp/dx (N/m ³)	$dp/dx/u$ (N·S/m ⁴)		
I	/	0.40	/	0.02~0.30	48~980	$3.18 + 2284u + 3320u^2$	$2372 + 2972u$	7.67×10^{-9}	0.216
II	30	0.35	83	0.03~0.46	25~546	$9.01 + 562.3u + 1364u^2$	$700.3 + 1031u$	2.60×10^{-8}	0.138
III	20	0.36	82	0.03~0.31	11~144	$3.89 + 216.4u + 798.7u^2$	$294.8 + 526.2u$	6.17×10^{-8}	0.108
IV	10	0.34	84	0.02~0.45	3~124	$0.20 + 123.9u + 341.4u^2$	$128.1 + 330.8u$	1.42×10^{-7}	0.103

* PPI=Pores per inch

** According to the data of UDICELL ceramic foam of special metals corporation

Table 2 Summary of input parameters

	Experimental input	Numerical input
Fig. 8	$K=2.6 \times 10^{-8} \text{m}^2$ $\epsilon=0.83$ $H=0.0111 \text{m}$	$Re=4538$ $\epsilon=0.83$ $Da=2.1 \times 10^{-4}$
Fig. 9	$K=2.6 \times 10^{-8} \text{m}^2$ $\epsilon=0.83$ $H=0.01905 \text{m}$	$Re=7788$ $\epsilon=0.83$ $Da=7.2 \times 10^{-5}$
Fig. 10	$K=1.4 \times 10^{-7} \text{m}^2$ $\epsilon=0.84$ $H=0.0111 \text{m}$	$Re=4538$ $\epsilon=0.84$ $Da=1.2 \times 10^{-3}$

석 결과, 나머지 둘은 다공질체가 없는 평판위를 흐르는 층류유동을 위한 식 (18)과 난류유동에서의 식 (19)를 나타낸 곡선으로, 이들 두식은 실험 및 이론 해석결과가 적절한지를 판단하기 위해 사용하였다. 실험에서 유동속도는 $u=6.5 \text{m/s}$ 였으며, 다공질체의 높이를 기준으로 한 국부 Sherwood수는 다음과 같이 표현된다.

$$Sh_H = \frac{h_m H}{D} = 0.332 Re_H^{1/2} Sc^{1/3} (H/x)^{1/2} \quad (18)$$

$$SH_H = \frac{h_m H}{D} = 0.0296 Re_H^{4/5} Sc^{1/3} (H/x)^{1/5} \quad (19)$$

3.4 실험 및 이론해석 결과

Fig. 8에서 실험에 의한 Sherwood수는 경계층의 발달로 인해 나프탈렌 평판의 선단 부근에서 매우 큼을 알 수 있으며 Sherwood수는 $x=0.055 \text{m}$ 부근까지 감소하나 후류(wake)의 영향으로 다공질체의 선단 직전에서 급격히 증가하여 다공질체가 부착된 $x=0.065 \text{m}$ 부근에서 최대치를 나타낸다. $x=0.065 \text{m}$ 를 지나면 다공질체의 영향으로 Sherwood수는 급격히 감소하나 $x=0.12 \text{m}$ 부근에서 다공질체 윗면, 후면 및 측면에서 발생하는 유동의 박리현상으로 인한 후류의 영향으로 Sherwood수는 다시 증가한다. 그림에서 다공질체 내에서의 실험 및 이론해석 결과는 잘 일치하고 있다. 다공질체를 고려하지 않은 두 식의 결과를 볼때, $x=0.075 \text{m}$ 까지는 다공질체보다 경계층 발달의 영향 및 후류의 영향이 크므로 실험 및 이론해석 결과보다 작게 나타나나, $x=0.075 \text{m}$ 를 지나면 그 결과는 역전된다.

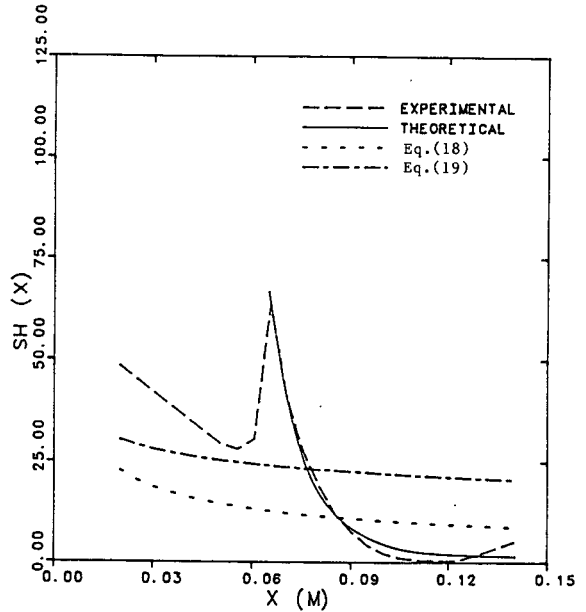


Fig. 8 A comparison of the experimental results and the theoretical results ($Re=4538, Da=2.1 \times 10^{-4}, \epsilon=0.83, Sc=2.56$)

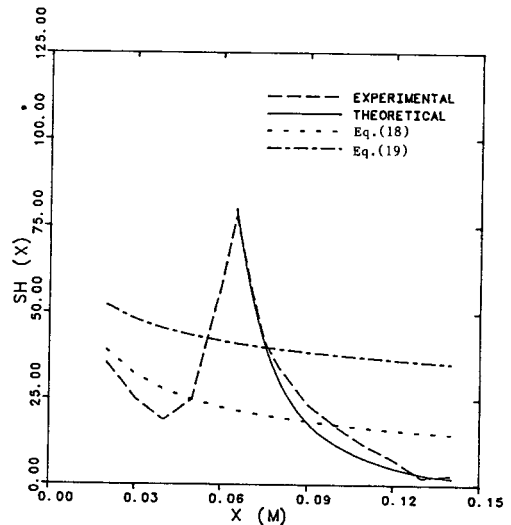


Fig. 9 A comparison of the experimental results and the theoretical results ($Re=7788, Da=7.2 \times 10^{-5}, \epsilon=0.83, Sc=2.56$)

Fig. 9에서 Sherwood수는 Fig. 8과 유사한 경향을 보이고 있으며, 실험 및 이론해석 결과는 서로 잘 일치하고 있다.

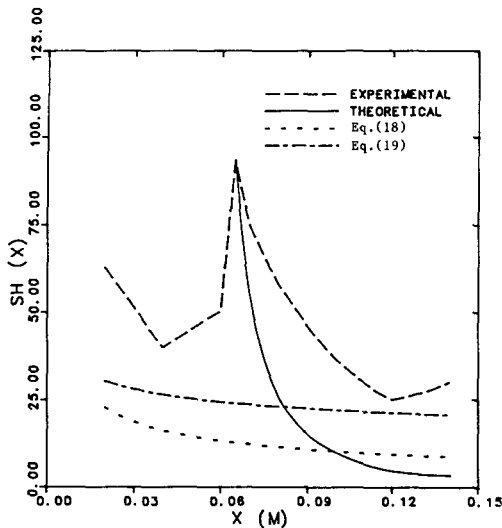


Fig. 10 A comparison of the experimental results and the theoretical results
($Re=4538$, $Da=1.2 \times 10^{-3}$, $\epsilon=0.84$, $Sc=2.56$)

Fig. 10의 결과 또한 Fig. 8이나 Fig. 9의 결과와 유사한 경향을 보이고 있으나 실험 및 이론적 Sherwood수 ($Da=1.2 \times 10^{-3}$)는 동일한 Reynolds수 ($Re=4538$)일지라도 전 영역에 걸쳐서 Fig. 8의 결과 ($Da=2.1 \times 10^{-4}$)보다 크게 나타나고 있으며, 실험과 이론해석 결과의 차이는 다공질체 내에서 더욱 커지고 있다. 식 (18) 및 (19)에 의한 결과가 실험결과보다 매우 작으므로 Darcy수가 클 경우 다공질체 앞에서는 경계층의 발달 및 후류의 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 후류가 유동에 미치는 영향은 다공질체의 측면, 윗면 및 후면에서도 또한 크게 나타나고 있다. 이로 인해 다공질체의 선단에서는 회전와류에 의해 유동의 관통이 확실히 증가하고 있으며, 반면에 다공질체의 후면에서는 유동의 역류에 의한 관통이 발생하여 물질전달계수가 약간 증가하고 있다. 해석적 모델에서는 이러한 영향요소들이 고려되지 않았다. 본 실험에서는 x 좌표를 2절에서 오는 달리 나프탈렌 평판의 선단에서부터 시작되었다.

3.5 열 및 물질전달의 유사성

앞서의 물질전달 해석결과에 “열 및 물질전달의 유사성”을 도입하면 열전달 결과로 전환시킬 수 있다.

비 다공질 영역

그 유사관계에 따르면, Sherwood수는 다음의 관계식들을 이용하여 Nusselt수로 전환시킬 수 있다⁽¹⁶⁾.

$$Sh = Cf(Re) Sc^n \quad (20)$$

$$Nu = Cf(Re) Pr^n \quad (21)$$

위의 관계식은 층류의 경우 이론적 계산 및 측정실험에 의해, 난류의 경우는 실험적 측정에 의해 얻어진 결과이다. 계수 C , 함수 $f(Re)$, 지수 n 은 지표면의 기하학적 특징, 유동특징(층류 또는 난류)에 의해 결정되나 유체의 성질과는 무관하다⁽¹⁷⁾.

윗식으로 부터 다음과 같은 관계식이 유도되어진다.

$$Nu = (Pr/Sc)^n Sh \quad (22)$$

평판위로 공기가 흐르는 경우 지수 N 은 $1/3$ 이며, 이 경우 Sherwood수에 $(0.712/2.56)$ 를 곱해 Nusselt수를 얻을 수 있다.

다공질 영역

다공질 영역에서 운동량 방정식은 Re 뿐만 아니라 Da 및 ϵ 의 함수로 표현되며, 질량 및 에너지 방정식은 각각 유효 Schmit수 및 Prandtl수의 함수이다. 따라서 위에서와 같은 과정을 거치면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$Sh = C_s f_s(Re, Da, \epsilon) SC_e^{n_s} \quad (23)$$

$$Nu = C_n f_n(Re, Da, \epsilon) Pr_e^{n_n} \quad (24)$$

윗식에서 $C_s = C_n$, $f_s = f_n$, and $n_s = n_n$ 이면, 식 (22)는 비 다공질 영역에서와 마찬가지로 다공질 영역에서도 유사관계가 성립된다.

$$Nu = (Pr_e/Sc_e)^n Sh \quad (25)$$

그러나 이러한 관계식은 우선 실험에 의해 유사관계가 입증되어야 하며, 이 또한 앞으로의 좋은 연구과제가 될 것으로 사료된다.

4. 결 론

평판의 선단으로 부터 어느정도 떨어진 거리에서 놓여진 다공질체 부근에서의 복사열전달의 영향을 고려하기 위해 열전달계수를 수치 해석적으로 계산하였다. 또한 해석적 모델의 검증을 위해 나프탈렌 승화법을 이용하여 복사열전달을 무시할 수 있는 경우에 대한 실험을 수행하였으며, 위의 결과들을 Sherwood수의 향으로 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열전달계수 수치해석 결과에 따르면, 원천유

속($Q_0=0\sim 3$)이 증가할수록 총열전달에 대한 복사 열전달의 영향이 커지는데, 이는 다공성 물질에 의한 복사흡수량 증가에 따른 것이다.

(2) 수치해석 결과는 Darcy수가 작을경우($Da=2.1\times 10^{-4}\sim 7.2\times 10^{-5}$) 실험결과와 잘 일치하므로 적절한 것으로 판단된다. 그러나 Darcy수가 큰경우($Da=1.2\times 10^{-3}$) 실험결과는 경계층의 발달 및 다공질체 부근에서의 후류의 영향으로 인해 이론 해석결과보다 매우 크게 나타났다. 수치해석에서는 이들의 영향이 고려되지 않았다.

(3) 실험에서 사용된 다공질 세라믹 블록의 침투율을 측정하였으며, 본 실험범위에서는 Forchheimer관계식의 적용이 적절함을 알 수 있다($K=1.42\times 10^{-7}\sim 7.67\times 10^{-9}$).

(4) 다공질 영역에서 $Nu=(Pr_e/Sc_e)^n Sh$ 의 관계식이 비다공질 영역에서와 마찬가지로 성립됨이 실험적으로 입증된다면, 본 연구에서의 물질전달 해석결과를 열/물질전달 유사관계를 이용해 열전달 해석으로 전환시킬 수 있다.

참고 문헌

- (1) Reifsnnyder, W.E., 1955, "Wind Profiles in a Small Isolated Forest Stand", *Forest Science*, Vol. 1, No.4, pp.289~297.
- (2) Denmead, O.T., 1964, "Evaporation Sources and Apparent Diffusivities in a Forest Canopy", *J. Applied Meteorology*, Vol. 3, pp.383~389.
- (3) Meroney, R.N., 1968, "Characteristics of Wind and Turbulence in and above Model Forests", *J. Applied Meteorology*, Vol.7, pp.780~788.
- (4) Kawatani, T. and Meroney, R.N., 1970, "Turbulence and Wind Speed Characteristics within a Model Canopy Flow Field", *Agricultural Meteorology*, Vol. 7, pp. 143~158.
- (5) Koh, J.C., etc., 1977, "Friction Factor for Isothermal and Nonisothermal Flow through Porous Media", *J. Heat Transfer*, Vol. 99, pp.367~373.
- (6) Hong, J. T., Tien, C.L., and Kaviany, M., 1985, "Non-Darcian Effects on Vertical-Plate Natural Convection in Porous Media with High Porosities", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, No. 11, pp.2149~2157.
- (7) Sparrow, E.M., and Bahrami, P.A., 1980, "Experiments on Natural Convection from Vertical Parallel Plates with Either Open or Closed Edges", *J. Heat Transfer*, Vol. 102, pp.221~227.
- (8) Han, J. C., etc., 1985, "Local Heat/Mass Transfer Distribution around Sharp 180 Degree Turn in a Smooth Square Channel", *Symposium on Transport Phenomena in Rotating Machinery*, Honolulu, April 28~May 3.
- (9) Lee, K.B., 1986, "Heat and Mass Transfer in Highly Porous Media", Ph. D. Dissertation, U. of Texas at Austin.
- (10) Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, pp. 269~289.
- (11) Ergun, S., 1952, "Fluid Flow through Packed Columns", *Chemical Engineering Progress*, Vol.48, pp.89~94.
- (12) Special Metals Corporation, UDICELL Ceramic, Japan.
- (13) Perry, J.H., editor, 1973, "Chemical Engineer's Handbook", 5th ed., McGraw-Hill, N.Y., pp.3~39.
- (14) Sogin, H.H., 1958, "Sublimation from Disks to Air Streams Flowing Normal to Their Surfaces", *Transaction ASME*, Vol. 80, pp.61~69.
- (15) Lee, K.B. and Lu, Z., 1988, "Experimental Determination of the Permeability of a Porous Media", *Energy R & D*, Vol. 10, No. 2.
- (16) Saboya, F.E.M. and Sparrow, E.M., 1976, "Experiments on a Three-Row Fin and Tube Heat Exchangers", *J.Heat Transfer*, pp.520~522.
- (17) Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., 1981, "Fundamentals of Heat Transfer", John Wiley, N.Y., p.324.