

水平 直四角 密閉空間에서의 對流物質傳達到 關한 數值的 研究

배 대 석

A Numerical Study on the Convective Mass Transfer in Horizontal Rectangular Enclosures

D. S. Bae

Key words : Mass Transfer(물질전달), Natural Convection(자연대류), Enclosure (밀폐공간), Numerical Simulation(수치해석)

Abstract

The characteristics of the convective mass transfer in horizontal rectangular enclosures with horizontal concentration gradients are analyzed. The effect of Grashof number(Gr) and aspect ratio(L/H) is investigated numerically using the control-volume method. Numerical results are obtained for Grashof numbers between 10^4 and 10^6 , aspect ratios from 1 to 100, and results are compared with existing analytical results. It is found that there exists a well defined aspect ratio for which the mean Sherwood number is maximum, and the core flow changes from parallel to non-parallel at $Gr^2 Sc^2 A^3 \geq 10^5$, and in the $Ra \rightarrow 0$ regime the numerical results agreed very well with correlation derived from analytical results.

Nomenclature

A	Aspect ratio(L/H)	H	Cavity height
C	Concentration	h_m	Mass transfer coefficient
c	Dimensionless conration	L	Cavity width
D	Diffusivity	L1	Number of grids in the x direction
Gr_H	Grashof number based on height($g\beta^* \Delta CH^3/\nu^2$)	M1	Number of grids in the y direction
Gr_L	Grashof number based on width($g\beta^* \Delta CL^3/\nu^2$)	Nu	Nusselt number
g	Gravitational constant	P	Pressure Dimensionless pressure
		Ra	Rayleigh number($g\beta^* \Delta CH^3/\nu D$)
		Sc	Schmidt number(ν/D)

Sh	Sherwood number(hmH/D)
U	Horizontal velocity component
u	Dimensionless horizontal velocity component
V	Vertical velocity component
v	Dimensionless vertical velocity component
X	Horizontal coordinate
x	Dimensionless horizontal coordinate
Y	Vertical coordinate
y	Dimensionless vertical coordinate
β^*	Volumetric expansion coefficient due to concentration gradient
ν	Kinematic viscosity

Subscript

L	Based on cavity width
H	Based on cavity height

1. 서 론

자연대류는 온도차 및 농도차에 의한 부력효과에 의해 일어나며, 강제적으로 유체를 유동시키는 것이 불가능하거나 허용되지 않을 때 중요하게 다루어지는 현상이다. 따라서 그 응용범위는 매우 넓고 여러 가지 기하학적 형상에 대하여 많은 연구가 수행되어져 왔다.⁽¹⁾ 특히 사각밀폐공간에서의 자연대류에 관한 연구는 주로 정사각형이나 수직 직사각형에 대한 것이 대부분이며, 수평 직사각 밀폐공간에 대한 연구는 상대적으로 미흡하다.^(2,3) 이 형상은 태양열 집열기, 건물내의 열적공간, 두 저장조를 연결하는 수평 직사각 덕트 그리고 수정성장(crystal growth)등에 사용된다. 최근에는 양질의 수정(crystal)을 형성하는데 자연대류가 좋지 않는 영향을 미치는 것으로 고려되어 자연대류를 감소시키거나 제거하는데 관심을 기울이고 있다.^(3,4) 또한 수평 직사각 덕트로 연결된 두 저장조에 공기를 넣고, 압력차가 공기유동에 미치는 영향을 검토하기 위해서는 두 저장조 공기의 관계습도차에 의해 일어나는 자연대류가 유동장에 미치는 영향은 제거되어야 한다. 따라서 덕트의 길이(형상비)가 관계습도차에 의한 대류물질 전달에 미치는 영향을 고찰하는 것은 대단히 흥미

로운 일이다.

Cormack등^(5,6)은 수평 직사각 밀폐공간에서의 자연대류 열전달을 해석적(analytical)으로 연구하였으며, $Pr=6.983$ 일 때 $10 \leq Gr \leq 2 \times 10^4$ 그리고 $1.0 \leq A \leq 20$ 범위에서의 수치해를 구하였다. Imberger(7)는 동일 형상에 대하여 실험적으로 연구하였다. 그들은 형상비(L/H)가 클 때 수평 직사각 밀폐공간내에서의 유동형태는 중심영역(core region)과 말단영역(end region)으로 구성됨을 보였다. Bejan등⁽⁸⁾은 해석적으로 연구하여 열전달 해석을 위한 3가지 모델(the $Ra \rightarrow 0$ regime, the intermediate regime, the boundary regime)과 평균 Nusselt수를 나타내는 상관관계식을 제시하였으며, Lee등⁽⁹⁾은 $10^6 \leq Gr \leq 3.0 \times 10^7$, $1.0 \leq A \leq 10$ 범위에서 유한차분법으로 수치해석하였다. Kamotani등⁽¹⁰⁾은 수평 온도 및 농도구배가 함께 있는 수평 직사각 밀폐공간에서의 자연대류에 관한 연구를 $Sc=2100$, $Pr=7.0$, $1.4 \times 10^5 \leq Gr_M \leq 1.0 \times 10^7$, $0.0 \leq Gr_T \leq 1.9 \times 10^6$, $1.8 \leq A \leq 7.7$ 범위에서 실험적으로 연구하여 여러 가지 복잡한 유동형태가 존재함을 보였으며, Han등⁽¹¹⁾은 수직 직사각 밀폐공간에 대하여 수치적으로 연구하여 다중셀 유동구조(multicell flow structure)를 밝혔다. 본 연구에서는 두 수평벽은 불투과벽으로 되어있고 마주보는 두 수직벽은 다른 농도를 가지고 있는 수평 직사각 밀폐공간내에서 Grashof 수와 형상비(L/H)가 농도차에 의한 대류물질전달에 미치는 영향을 수치해석하고, 그 결과를 기존의 해석적 연구결과와 비교 검토하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식 및 경계조건

물질농도차가 있는 두 저장조를 연결하는 수평 직사각 덕트 내에서의 자연대류 물질전달특성을 고찰하기 위하여, Fig.1에 나타난 바와 같이 형상을 단순화하여 2차원 수평 직사각 밀폐공간을 계산영역으로 하였다. 왼쪽 수직벽은 높은농도(C_{high})를, 오른쪽 수직벽은 낮은농도(C_{low})를 가지며, 두 수직벽의 온도는 동일하다. 그리고 위와 아

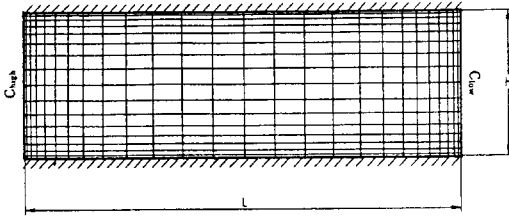


Fig. 1 Enclosure geometry and grid system.

래의 수평벽은 단열과 불투과벽으로 되어있다. 따라서 본 연구에서 고려한 수평 직사각 밀폐공간에서의 자연대류에 의한 물질전달은 오로지 마주보고 있는 두 수직벽의 농도차에 의해 일어난다. 이상의 모델에서의 대류물질전달 특성을 수치해석하기 위해 필요한 지배방정식은 다음의 가정으로 단순화되었다.

- (1) 정상상태, 비압축성 층류유동이다.
- (2) 모든 물성치들은 부력항을 제외하고는 일정하고, 부력항에 대해서는 Boussinesq근사를 적용한다.
- (3) 점성소산과 복사는 무시한다.

위의 가정들에 기초한 무차원 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식 :

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

x - 방향 운동량방정식 :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{2}$$

y - 방향 운동량 방정식 :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + Gr_c \tag{3}$$

농도 방정식 :

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{1}{Sc} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \tag{4}$$

여기서 사용된 무차원 변수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{H}, y = \frac{Y}{H}, u = U \frac{H}{\nu}, v = V \frac{H}{\nu}, \\ p &= \frac{PH^2}{\rho \nu^2}, c = \frac{C - C_{low}}{C_{high} - C_{low}}, Sc = \frac{\nu}{D}, \\ Gr &= \frac{g\beta H^3(C_{high} - C_{low})}{\nu^2} \end{aligned} \tag{5}$$

그리고 본 형상에 적용한 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{왼쪽 수직벽} : c=1, u=v=0 \\ \text{오른쪽 수직벽} : c=0, u=v=0 \\ \text{위와 아래 수평벽} : \frac{\partial c}{\partial y} = 0 \end{aligned} \tag{6}$$

2.2 수치해석 방법

수치해석을 위하여 무차원 지배방정식 (1)~(4)를 Patankar⁽¹²⁾가 제안한 제어체적법에 의해 이산화시켰다. 운동량방정식에 나타나는 압력항은 SIMPLER 알고리즘을 사용하여 계산하였고, 대류항은 멱승도식법(power law scheme)을 사용하였다. 또한 격자망은 스칼라 량과 속도 u 및 v의 격자점이 서로 다른 엇갈린 격자망을 사용하였다. 이산화방정식의 해는 선순법을 이용한 TDMA방법으로 구하였고, 수렴촉진을 위하여 하향이완을 하였다. 이완계수는 Grashof수와 형상비(L/H)의 변화에 따라 약간씩 변화시켜 수렴안정성과 수렴속도를 개선하였다. 격자계는 비균일 격자계를 사용하였고, 격자간격은 식(7)을 사용하여 물리량들의 큰 구배가 예상되는 벽근처에 격자가 조밀하게 배치되도록 하였다.

$$XU(I) = \frac{L}{2H} \left[\frac{I-2}{L/2-1} \right]^n \quad (I \leq L/2)$$

$$XU(I) = \frac{L}{2H} + \frac{L}{2H} \left[1 - \left(\frac{L1-I}{L/2-1} \right)^n \right] \quad (I > L/2)$$

$$YV(J) = \frac{1}{2} \left[\frac{J-2}{M/2-1} \right]^n \quad (J \leq M/2)$$

$$YV(J) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{M1-J}{M/2-1} \right)^n \right] \quad (J > M/2) \tag{7}$$

여기서 XU(I)와 YV(J)는 제어체적면의 위치를

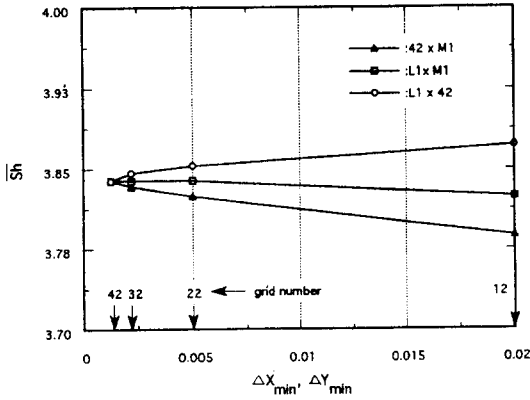


Fig. 2 Examination of grid independence of numerical solution at $Gr=10^5$, $Sc=0.6$ and $L/H=1.0$

나타내고, L1과 M1은 x와 y방향의 격자수를 나타내며, n은 격자간격의 조밀정도를 결정하는 지수이다. 해의 격자계 비의존성을 위하여 $Gr_H=10^5$, $Sc=0.6$ 그리고 $L/H=1.0$ 일 때 여러 가지 격자수에 따른 결과를 구하여 비교하였다. Fig.2에서 보는 바와 같이 n=2인 경우 Δx_{min} 과 Δy_{min} 이 0.005보다 적을 때 (L1=22, M1=22) 격자가 해에 미치는 영향은 최대 0.38% 이내이다. 따라서 본 연구에서는 M1은 Δy_{min} 이 0.005가 되도록 고정하고 (M1=22) L1은 형상비가 변할 때 변화시켜 Δx_{min}

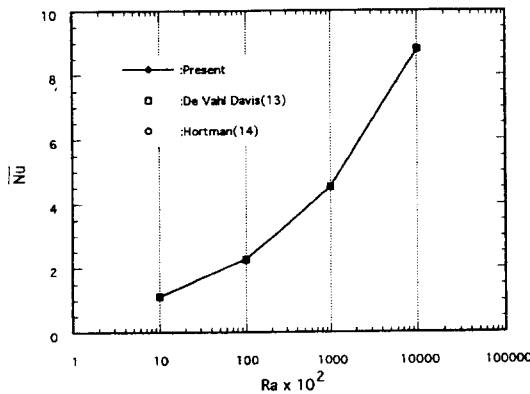


Fig. 3 The mean Nusselt number for various Grashof numbers at $Pr=0.7$, $L/H=1.0$.

이 0.005이하가 되도록 하였다. 그리고 모든 변수 (B)가 계산영역내의 모든 격자점에서 다음의 수렴 판정식을 만족할 때 수렴된 해로 간주하였다.

$$\left| \frac{B_{i,j}^{m+1} - B_{i,j}^m}{B_{i,j}^m} \right| < 10^{-5} \quad (8)$$

본 연구결과의 타당성을 검증하기 위해 본 프로그램으로 정사각형 밀폐공간에서의 자연대류 열전달($L/H=1.0$, $Pr=0.7$)해를 구하여 기존의 수치 해석 결과와 비교하였다. Fig.3에서 보는 바와 같이 기존의 수치 해석 결과 (benchmark solution)^{13,14)}와 잘 일치하며 최대오차는 $Ra=10^6$ 일 때 0.884%이다.

3. 결과 및 고찰

본 연구와 관련되는 무차원 변수는 형상비 (L/H), Grashof수(Gr), Schmidt수(Sc), 그리고 Prandtl수(Pr)등이 있다. 여기서는 형상비와 Grashof수가 수평 직사각 밀폐공간내에서 마주보는 두 수직벽의 물질농도차에 의해 발생하는 대류 물질전달에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 따라서 두 수직벽의 온도는 동일하게 두어 두 수직벽의 온도차에 의해 발생하는 자연대류 유동효과를 제거하였고, Schmidt수를 0.6으로 고정하여 오로지 마주보는 두 수직벽의 관계습도차에 의해 발생하는 유동만을 고려하였다. 그리고 형상비는 $1 \leq L/H \leq 100$, 수평 직사각 밀폐공간의 높이를 대표 길이로 한 Grashof수는 $10^4 \leq Gr_H \leq 10^6$ 범위내로 변화시키면서 수치해를 구하였고, 수치해석 결과는 동일형상에서의 자연대류 열전달에 관하여 연구한 결과와 비교하였다. 이는 물질전달과 열전달은 상호 유사성을 가지고 있기 때문이다. Fig. 4는 형상비(L/H)와 Grashof수(Gr_H)가 평균 Sherwood수에 미치는 영향을 나타낸다. 평균 Sherwood수는 형상비(L/H)가 증가함에 따라 증가하다가 Grashof수에 따라 각각 일정 형상비에서 최대치를 가지고 다시 서서히 감소하였다. 본 수치해석 결과를 수평 직사각 밀폐공간의 넓이를 대표 길이로 한 Grashof수 $10^6 \leq Gr_L \leq 3 \times 10^7$, 형상비 $1.0 \leq$

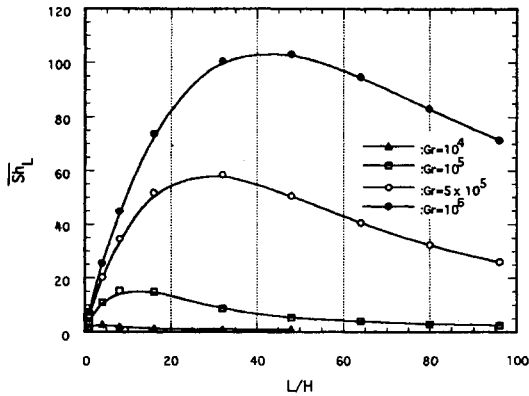


Fig. 4 The effect of aspect ratio on the mean mass transfer rate for various Grashof numbers at Sc=0.6.

L/H ≤ 10 범위에서 해를 구한 Lee와 Sernas⁽⁹⁾의 결과와 완전히 비교하는 것은 어렵지만, 전체적으로 Gr와 L/H가 \overline{Nu} 및 \overline{Sh} 에 미치는 영향의 경향은 비슷하다. Lee등⁽⁹⁾은 L/H = 1.0에서 평균 Nusselt수가 최대가 된다는 Boyack등⁽¹⁵⁾의 연구결과는 $Gr_L \leq 10^6$ 에서만 타당하고 $Gr_L > 10^6$ 에서 최대 평균 Nusselt수는 L/H = 1.0에서 발생하지 않고 L/H가 1.0보다 큰 값에서 나타남을 보였다. 즉 $Gr_L = 5.45 \times 10^6$ 일 때는 L/H = 2.0부근에서 평균 Nusselt수가 최대가 되었고 $Gr_L = 3 \times 10^7$ 일 때는 L/H = 10/3부근에서 최대가 되었다. 본 연구에서 평균 Sherwood수가 최대가 되는 형상비는 $Gr_H = 10^4$ 일 때 L/H = 4.0부근에서, $Gr_H = 10^5$ 일 때 L/H = 12부근에서, $Gr_H = 5 \times 10^5$ 일 때 L/H = 30부근에서 그리고 $Gr_H = 10^6$ 일 때는 L/H = 40부근에서 나타나 평균 Sherwood수가 최대가 되는 형상비를 Gr_H 의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있었고, Fig.5에서 보는 바와 같이 수치해석 결과와 잘 일치하였다.

$$(L/H)_{\overline{Sh}=\max} = a(Gr_H)^n \quad (9)$$

여기서 a = 0.036701 그리고 n = 0.50736이다.

Fig.6, Fig.7 그리고 Fig.8은 $Gr_H = 10^4$, $Gr_H = 10^5$ 그리고 $Gr_H = 10^6$ 일 때 각각 형상비의 변화에

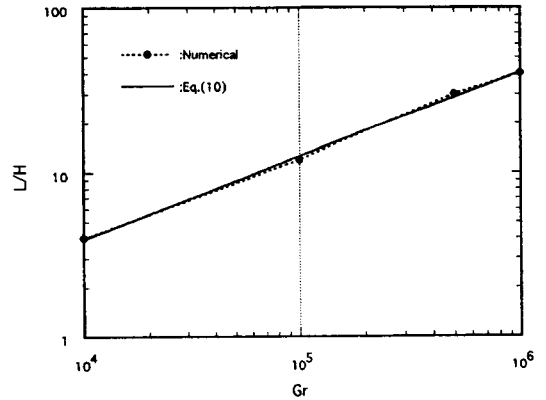


Fig. 5 Aspect ratio chart comparing present results with Eq.(10) for various Grashof numbers at Sc=0.6

따른 등농도선과 유선을 나타낸다. $Gr_H = 10^4$ 일 때 유선은 Cormark등⁽⁵⁾이 보여준 바와 같이 전형적인 두 영역으로 되어 있다. 즉 유체가 평행으로 흐르는 중심영역(core region)과 180° 방향을 바꾸는 말단영역(end region)으로 되어 있다. 이러한 유동형태는 형상비(L/H)가 증가할수록 더 뚜렷이 나타난다. 그리고 L/H = 32인 경우 두 수직벽의 농도차에 의한 대류유동은 미약하고, 질량전달은 거의 확산에 의하여 이루어지고 있음을 알 수 있다. 한편 Gr_H 가 증가하면 중심영역에서 유동은 평행유동에서 비평행유동으로 바뀌고, 유동방향을 바꾸는 말단영역에서는 상하대칭에서 비대칭의 형태로 바뀐다. 따라서 Gr_H 와 L/H 는 수평 직사각 밀폐 공간에서의 유동형태에 크게 영향을 미침을 알 수 있다. Fig.6에서 보는 바와 같이 $Gr_H = 10^4$ 일 때 L/H = 8.0 ($Gr^2 Sc^2 A^{-3} = 7.03125 \times 10^4$)에서 유동형태는 거의 평행유동이나 L/H = 4.0 ($Gr^2 \cdot Sc^2 \cdot A^{-3} = 5.62500 \times 10^5$)에서는 비평행유동을 보이기 시작하고, Fig.7에서 $Gr_H = 10^5$ 일 때 L/H = 32 ($Gr^2 \cdot Sc^2 \cdot A^{-3} = 1.09863 \times 10^5$)에서 유동은 거의 평행유동형태를 가지나 L/H = 16 ($Gr^2 \cdot Sc^2 \cdot A^{-3} = 8.78960 \times 10^5$)에서는 비평행유동이 된다. 그리고 Fig.8에서는 모두 비평행유동형태를 가지고 $Gr^2 \cdot Sc^2 \cdot A^{-3} \geq 3.25417 \times 10^6$ 이다. 이상의 고찰

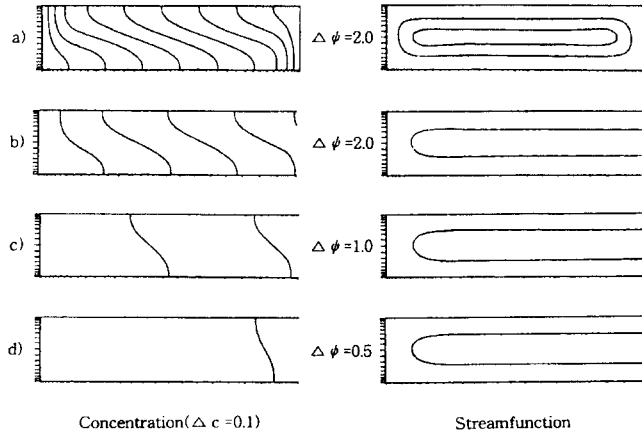


Fig. 6 Iso-concentrations and streamlines for $Gr=10^4$, $Sc=0.6$ and $L/H=$ a) 4, b) 8, c) 16, d) 32.

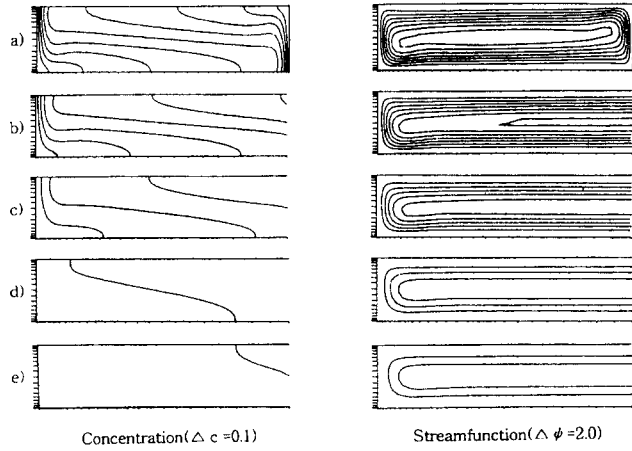


Fig. 7 Iso-concentrations and streamlines for $Gr=10^5$, $Sc=0.6$ and $L/H=$ a) 4, b) 8, c) 16, d) 32, e) 48.

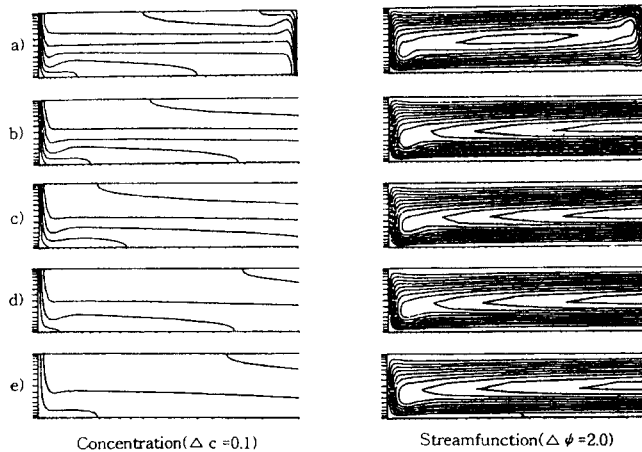


Fig. 8 Iso-concentrations and streamlines for $Gr=10^6$, $Sc=0.6$ and $L/H=$ a) 4, b) 8, c) 16, d) 32, e) 48.

로 부터 중심영역에서의 유체유동이 평행유동이 되는 $Gr^2 \cdot Sc^2 \cdot A^{-3}$ 의 범위는 개략적으로 $Gr^2 \cdot Sc^2 \cdot A^{-3} \leq 10^5$ 임을 추정할 수 있으며, 이 결과는 Cormark등⁽⁶⁾의 연구결과와도 잘 일치한다. 또한 Cormark등^(5,7)은 Ra_H 가 고정되고 $L/H \rightarrow \infty$ 일 때 \overline{Nu} 는 $Ra^2 A^{-2} + 1$ 에 비례함을 보였고, Bejan등⁽⁸⁾은 수평 직사각 밀폐공간에서의 자연대류 열전달을 세가지 모델($Ra \rightarrow 0$ regime, intermediate regime, boundary regime)로 구분한 후 Cormark 등⁽⁵⁾의 해석적 연구결과를 발전시켜 $Ra \rightarrow 0$ 모델에 적용되는 상관관계식을 제시하였다. 그 상관관계식을 물질전달과 관련되는 평균 Sherwood수에 관한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\overline{Sh}_L = 1 + \frac{1}{362880} (Ra_H \cdot \frac{H}{L})^2 \quad (10)$$

또한 각 모델에 대한 연구결과를 종합하여 세가지 모델에 동시에 적용할 수 있는 상관관계식을 다음과 같이 제시하였으며, 평균 Sherwood수에 관한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\overline{Sh}_L = 1 + \left\{ \left[\frac{(Ra_H \cdot /A)^2}{362,880} \right]^n + \left[0.623 \frac{Ra_H^{1/5}}{A} \right]^n \right\}^{1/n} \quad (11)$$

여기서 $n = -0.386$ 이다. 본 연구에서는 해석적 연구 결과로 도출된 위 두식을 Grashof수와 형상비(L/H)변화에 따른 수치해석결과와 비교하기 위하여 사용하였고, Fig.9과 Fig.10에 나타내었다. $Gr_H = 10^4$ 인 경우 $L/H > 10$ 에서는 수치해석 결과와 식(10),(11)의 결과는 잘 일치하나 $L/H < 10$ 에서는 대단히 큰 차이를 보인다. 이는 $L/H > 10$ 이면 Bejan등⁽⁸⁾의 $Ra \rightarrow 0$ regime에 속하고 $L/H < 10$ 이면 intermediate regime에 속하기 때문이다. 그리고 식(11)은 $L/H = 1.0$ 인 경우를 제외하고는 수치해석 결과와 비슷한 경향을 보인다. $Gr_H = 10^5$ 인 경우 식(10)은 Fig.9의 경우와 유사하나 수치해석 결과에 근접되는 L/H 의 값이 다르다. 이는 $Ra \rightarrow 0$ regime에 속하는 L/H 의 값이 Grashof수의 변화에 따라 변하기 때문이다⁽⁹⁾. 그리고 식(11)은 수치해석 결과와 정성적으로 비슷한 경향을 가지나 여전히 L/H 가 작을 때는 정량적으로 상당한 차이를 보인다. 식(10),(11)이 수치해석 결과와 차이를 보

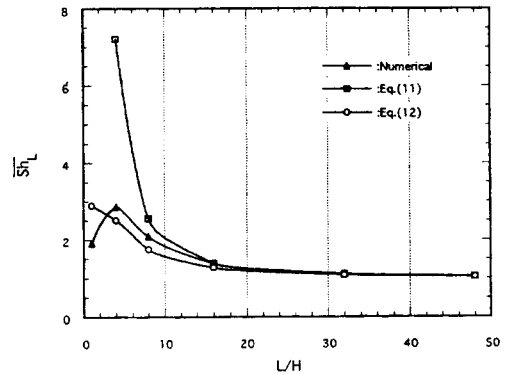


Fig. 9 Comparison between the present numerical results and the analytical results at $Gr=10^4$, $Sc=0.6$

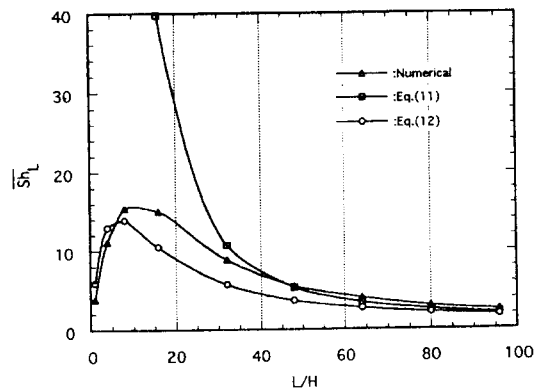


Fig. 10 Comparison between the present results and the analytical at $Gr=10^5$, $Sc=0.6$

이는 것은 Bejan등⁽⁸⁾이 해석적으로 연구할 때 유체유동은 평행유동이라고 가정하고 식을 도출해 내었기 때문이다. 실제유동은 Fig.6, Fig.7 그리고 Fig.8에서 보는 바와 같이 항상 평행유동이 아니고 Gr_H 와 L/H 의 영향을 받아 비평행유동으로 바뀐다. 따라서 Bejan등⁽⁸⁾의 상관관계식은 $Ra \rightarrow 0$ regime에서는 타당하나 나머지 영역에서는 상당한 오차를 보이므로 이를 수정 및 보완할 필요가 있으며, 개선된 상관관계식을 만들기 위해 더 많은 연구가 필요하다. 한편 Fig.9과 Fig.10에서 보는 바와 같이 형상비(L/H)를 아무리 길게해도 대류물질전달에 의한 유동의 영향은 없앨 수 없음을 알 수 있다. 이 결과는 식(10)으로부터도 유추되

어진다. 식(10)에서 \overline{Sh}_L 의 최소값은 1이다. \overline{Sh}_L 가 1이 되기 위해서는 $(Ra_H H/L) \rightarrow 0$ 이 되어야 한다. 그러기 위해서는 $Ra_H \rightarrow 0$ 이 되거나 $L/H \rightarrow \infty$ 가 되어야 한다. $\overline{Sh}_L = 1.2$ 일 때 대류물질전달의 영향을 무시한다 하더라도 $Gr_H = 10^4$ 인 경우 $L/H = 37$ 이 되어야 하고, $Gr_H = 10^5$ 인 경우 $L/H = 371$ 이 되어야 한다. 따라서 대류물질전달에 의한 유동의 영향을 없애기 위해서 수평연결관의 사용은 타당치 않고, 수직관 형태로 두 저장조를 연결하여 상부 저장조는 물질농도를 낮게하고 하부 저장조는 물질농도를 높게하여 대류물질전달에 의한 유동의 영향을 제거하는 것이 타당함을 알 수 있다.

4. 결 론

수평 직사각 밀폐공간내에서 $Sc = 0.6$ 일 때 Grashof수 ($10^4 \leq Gr_H \leq 10^6$)와 형상비 ($1 \leq L/H < 100$)가 마주보는 두 수직벽의 물질농도차에 의해 발생하는 대류물질전달에 미치는 영향을 수치적 방법으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평균 Sherwood수(\overline{Sh}_L)가 최대가 되는 형상비(L/H)가 존재하며, 그 때의 형상비는 다음의 식으로 나타낼 수 있었다.

$$(L/H)_{\overline{Sh}_L = \max} = 0.036701(Gr_H)^{0.50736}$$

(2) 수평 직사각 밀폐공간의 중심영역(core region)에서 유동형태는 $Gr^2 Sc^2 A^3 < 10^5$ 에서 평행 유동형태를 보였으며, 이는 기존의 연구결과와도 잘 일치하였다.

(3) 해석적 연구결과에 의해 도출된 기존의 상관관계식은 Bejan 등¹⁸⁾이 제시한 3모델중 $Ra \rightarrow 0$ regime에서는 타당하나 나머지 모델에 대해서는 수치해석 결과와 상당한 차이를 나타내었다. 따라서 개선된 상관관계식 개발을 위해 지속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R.L., and Sammakia, B., 1988, Buoyancy - Induced Flows and Transport, Hemisphere Pub. Co.
2. Ostrach, S., 1972, "Natural Convection in Enclosures," *Advanced in Heat Transfer*, Vol. 8, pp. 161 - 227.
3. Ostrach, S., 1988, "Natural Convection in Enclosures," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 1175 - 1190.
4. Kirkpatrick, A.T., and Bohn, M., 1986, "An Experimental Investigation of Mixed Cavity Natural Convection in the High Rayleigh Number Regime," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, No. 1, pp. 69 - 82.
5. Cormack, D.E., Leal, L.G., and Imberger, J., 1974, "Natural Convection in a Shallow Cavity with Differentially Heated End Walls. Part 1. Asymptotic Theory," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 65, pp. 209 - 229.
6. Cormack, D.E., Leal, L.G., and Seinfeld, J.H., 1974, "Natural Convection in a Shallow Cavity with Differentially Heated End Walls. Part 2. Numerical Solutions," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 65, pp. 231 - 246.
7. Imberger, J., 1974, "Natural Convection in a Shallow Cavity with Differentially Heated End Walls. Part 3. Experimental Results," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 65, pp. 247 - 260.
8. Bejan, A., and Tien, C.L., 1978, "Laminar Natural Convection Heat Transfer in a Horizontal Cavity with Different End Temperatures," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 100, pp. 641 - 647.
9. Lee, E.I., and Sernas, V., 1980, "Numerical Study of Heat Transfer in Rectangular Air Enclosures of Aspect Ratio Less Than One," ASME Paper 80 - WA/HT - 43.
10. Kamotani, Y., Wang, L.W., Ostrach, S., and Jiang, H.D., 1985, "Experimental Study of Natural Convection in Shallow Enclosures with Horizontal Temperature and Concentration Gradients," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 1, pp. 165 - 172.
11. Han, H., and Kuehn, T.H., 1989, "A Numerical Simulation of Double Diffusive Natural Convection in a Vertical Rectangular Enclosure," 1989 National Heat Transfer

- conference, HTD - Vol. 107, pp. 149 - 154.
12. Patankar, S.V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw - Hill, New York.
 13. De Vahl Davis, G., 1983, "Natural Convection of Air in a Square Cavity: A Bench Mark Numerical Solution," Int. J. for Numerical Method in Fluids, Vol. 3, pp. 249 - 264.
 14. Hortmann, M., Peric, M., and Scheuerer, G., 1990, "Finite Volume Multigrid Prediction of Laminar Natural Convection: Bench Mark Solutions," Int. J. for Numerical Method in Fluids, Vol. 11, pp. 189 - 207.
 15. Boyack, B. E., and Kearney, D. W., 1972, "Heat Transfer by Laminar Natural Convection in Low Aspect Ratio Cavities," ASME Paper 72 - HT - 52.

저 자 소 개



배대석 (裵大錫)

1955년 2월생. 1980년 2월 부산대학교 기계공학과 졸업. 1984년 동아대학교 대학원 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(박사). 1994년 University of Minnesota(post doctor). 현재 부경대학교 기계·자동차공학부 교수.