

측면가열 자연대류 밀폐공간에서 고체 삽입물이 열성층화에 미치는 영향

김 수 현, 김 서 영^{*†}, 강 병 하^{**}

국민대학교 대학원, ^{*}한국과학기술연구원 열·유동제어연구센터, ^{**}국민대학교 기계·자동차공학부

Effect of a Solid Insert on Thermal Stratification in a Side-Heated Natural Convection Enclosure

Su Hyeon Kim, Seo Young Kim^{*†}, Byung Ha Kang^{**}

Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

^{*}*Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, Korea*

^{**}*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*

(Received September 8, 2003; revision received December 29, 2003)

ABSTRACT: Effect of a solid insert on thermal stratification in the natural convection enclosure is numerically investigated. The enclosure consists of two differently heated vertical walls and two adiabatic horizontal walls. A solid insert is located in the middle of the enclosure. The nondimensional governing equations are solved by using the SIMPLER algorithm. The computations are carried out with the variations of thermal conductivity, width and height of the solid insert. The Prandtl number of the fluid in an enclosure is fixed at $Pr=0.71$. Two cases of Rayleigh number are considered in the present study, i.e., $Ra=10^3$ and 10^6 . The thermal stratification attenuates as thermal conductivity, width, and height of the solid insert are increased. As the thermal conductivity ratio of a solid insert to fluid increases beyond $k_s/k_f \approx 10^3$, the thermal stratification ratio shows an asymptotic value.

Key words: Thermal stratification(열성층화), Natural convection(자연대류), Enclosure(밀폐공간), Numerical analysis(수치해석), Solid insert(고체 삽입물)

기 호 설 명

F : 부력항 제어상수
g : 중력 가속도 [m/s^2]
h : 고체 삽입물의 높이 [m]
H : 밀폐공간의 높이 [m]

k_f : 유체의 열전도율 [W/mK]
 k_s : 고체의 열전도율 [W/mK]
L : 밀폐공간의 폭 [m]
 Nu_o : 평균 Nusselt 수
P : 무차원 압력, $P = p / (\rho \nu^2 / H^2)$
Pr : Prandtl 수
Ra : Rayleigh 수
 Rs : 성층화 비, S/S_o
S : 고체 삽입물이 있을 때의 성층화 계수
 S_o : 고체 삽입물이 없을 때의 성층화 계수

† Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5683; fax: +82-2-568-5689

E-mail address: seoykim@kist.re.kr

- T : 온도 [°C]
 u, v : 수평, 수직 방향의 속도 [m/s]
 U, V : 무차원 수평, 수직 방향의 속도,
 $U = uH/\nu, V = vH/\nu$
 w : 고체 삽입물의 폭 [m]
 x, y : 직교좌표 [m]
 X, Y : 무차원 직교좌표, $X = x/H, Y = y/H$

그리스 문자

- α : 열확산계수 [m^2/s]
 Γ : 무차원 확산계수
 θ : 무차원 온도
 λ : 고체 삽입물과 유체의 열전도율 비, k_s/k_f
 ν : 유체의 동점성계수 [m^2/s]
 Ψ : 유선함수

하첨자

- c : 저온
 f : 유체
 h : 고온
 s : 고체

1. 서 론

밀폐공간에서의 자연대류 현상은 원자로 및 전자장비의 냉각장치, 태양열 집열기 등에서 흔히 관측되는 것으로 그동안 활발한 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 열전달을 증가시키거나 밀폐공간 내부의 온도 성층화를 제어하기 위하여 밀폐공간 내에 핀 장애물을 설치한 연구가 보고되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 이러한 경우에 밀폐공간 내의 열유동장은 전도열전달과 자연대류의 복합적인 작용을 보이게 된다.

Nansteel et al.⁽¹⁾은 물로 채워져 있는 직사각형 밀폐공간에 1개의 수직 칸막이가 존재하는 경우에 밀폐공간의 온도분포에 대한 실험적 연구를 수행하였다. Emery⁽²⁾는 원자로의 냉각장치를 모델로 한 개의 수직 차폐막이 공간 내부에 부착되었을 때 온도분포에 미치는 차폐막 길이의 영향을 보고하였다.

밀폐공간 내의 내부 발열체 및 고온 물체의 영향에 관한 연구로서는 Exeter et al.⁽³⁾이 유한요소법으로 공간 내에 존재하는 발열체의 열전달 특성을 보고하였고, House et al.⁽⁴⁾은 정사각형 밀폐공간 내부에 고체블럭이 존재하는 경우 고체블럭의 열전도율과 크기의 변화에 따른 열전달 특성을 보고하였다. 이러한 기존 연구들은 밀폐공간 안의 고체 삽입물이 열전달과 온도분포에 미치는 영향을 중점적으로 다루었으나 밀폐공간 내부의 온도 성층화 측면에서의 분석은 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 밀폐공간 안의 중앙부에 한 개의 고체 삽입물이 존재하는 경우에 내부 온도 성층화를 조사하기 위해 수치해석을 수행하였다. 고체 삽입물의 열전도율의 변화, 고체 삽입물의 폭과 높이의 변화에 따른 성층화 비의 변화를 고찰하여 밀폐공간 내부의 온도 성층화 제어를 위한 기초 정보를 얻고자 하였다.

2. 지배방정식 및 경계조건

2.1 지배방정식

해석모델은 Fig. 1과 같이 높이가 H 이고, 폭이 L 인 정사각으로 상·하면은 단열이고, 좌·우면은 각각 고온(T_h) 및 저온(T_c)으로 일정하게 유지되며 밀폐공간 내부에는 고체 삽입물이 존재한다.

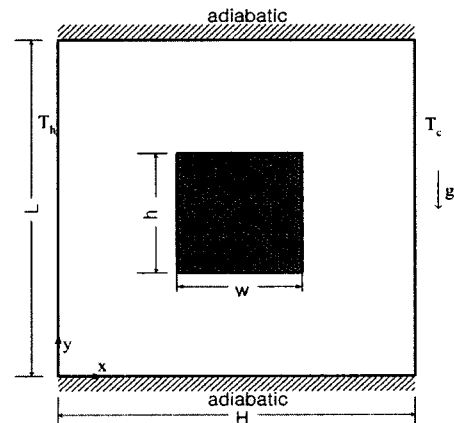


Fig. 1 Schematic of enclosure with a solid insert.

밀폐공간 내의 유체는 비압축성, Newton 유체이고 물성치는 온도에 따라 일정하며, 유체의 유동은 2차원 층류로 가정하였다. 온도변화에 따라 발생하는 밀도변화는 Boussinesq 근사를 도입하였다. 지배방정식을 무차원하면 다음과 같다.

연속방정식

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \Gamma \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial X} \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \Gamma \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{Ra}{Pr} \theta(1-F) \quad (3)$$

에너지방정식

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\lambda}{Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

식(1)~(4)에서 사용된 무차원 변수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{H}, \quad Y = \frac{y}{H}, \quad U = \frac{uH}{\nu}, \quad V = \frac{vH}{\nu}, \\ P &= \frac{p}{(\rho\nu^2/H^2)}, \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \\ Ra &= \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad \lambda = \frac{k_s}{k_f} \end{aligned} \quad (5)$$

무차원화된 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X=0, \quad 0 < Y < 1, \quad \theta &= 1 \\ X=1, \quad 0 < Y < 1, \quad \theta &= 0 \\ Y=0, \quad 0 < X < 1, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} &= 0 \\ Y=1, \quad 0 < X < 1, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

고체부분

$$\Gamma = \infty, \quad \lambda = k_s/k_f, \quad F = 1 \quad (7)$$

유체부분

$$\Gamma = 1, \quad \lambda = 1, \quad F = 0 \quad (8)$$

여기서, Γ 는 무차원 확산계수이고, λ 는 고체와 유체의 열전도율의 비이며, F 는 부력항 제어상수이다. 식(7)에서 고체부분을 $\Gamma=10^{20}$ 의 매우 큰 값으로 고정함으로써 속도성분을 0으로 만들 수 있다. 따라서 식(4)는 고체 삼입물 영역에서 전도 방정식이 된다.

2.2 성층화 비의 정의

성층화 계수는 밀폐공간 내부에 형성되는 온도 분포의 성층화 정도를 나타내며, 본 연구에서는 벽면의 경계층 두께와 고체 삼입물의 경계층 두께에 큰 영향을 받지 않는 곳인 $Y=0.1$ 과 $Y=0.9$ 를 선택하여 식(9)과 같이 정의하였다.

$$S = \frac{1}{\Delta X} \int_{0.1}^{0.9} \frac{\Delta \theta}{\Delta Y} dX \quad (9)$$

즉, S 는 Y 가 0.1과 0.9인 지점 사이의 온도구배를 $X=0.1$ 에서 0.9까지 평균한 값이며, 성층화 비는 고체 삼입물이 없을 때의 성층화 계수 S_0 에 대한 S 의 값으로 식(10)과 같이 정의하였다.

$$R_s = \frac{S}{S_0} \quad (10)$$

그러므로 $R_s < 1$ 이면 고체 삼입물에 의해 밀폐공간 내부의 온도 성층화가 약화됨을 의미한다.

2.3 수치해석 방법

위에서 유도한 지배방정식을 수치해석하기 위하여 본 연구에서는 유한체적법(finite volume formulation)에 기초한 SIMPLER Algorithm을 사용하였다. 벽면에서의 큰 속도 및 온도구배를 해석

Table 1 Nusselt number comparisons

The present grids		36×36	54×54	72×72	90×90	108×108	126×126
Ra=10 ³	Nu _o	1.11754	1.11783	1.11796	1.11804	1.11809	1.11813
Nu _o [5]	Error (%)	-0.0490	-0.0748	-0.086	-0.0934	-0.0980	-0.1012
Nu _o [6]	Error (%)	-0.7708	-0.7967	-0.808	-0.8155	-0.8201	-0.8233
Ra=10 ⁶	Nu _o	8.76178	8.78505	8.79641	8.80315	8.80762	8.8108
Nu _o [5]	Error (%)	0.62625	0.36226	0.23345	0.15701	0.10635	0.07032
Nu _o [6]	Error (%)	0.71858	0.45484	0.32615	0.24978	0.1991	0.16317

하기 위하여 조밀한 격자계를 사용하였고 속도에 대하여는 엇갈린 격자계(staggered grid)를 사용하였다. 대류항에는 QUICK Scheme을 사용하였다. 수렴의 척도로 유동장이 연속방정식을 10⁻⁶ 이내로 만족시키고, 고온 벽과 저온 벽에서의 평균 Nusselt 수의 차가 0.1% 이내로 만족하도록 하였다. 평균 Nusselt 수는 식(11)과 같이 정의하였다.

$$Nu_o = - \int_0^1 \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0} dY \quad (11)$$

수치해석 결과의 타당성 검증을 위하여 고체 삽입물이 없는 밀폐공간에 대한 de Vahl Davis⁽⁵⁾와 Ple⁽⁶⁾의 결과와 비교하였다. 또한 격자수의 영향을 살펴보기 위하여 36×36, 54×54, 72×72, 90×90, 108×108, 126×126 격자계에 대해서 반복 계산하여 Table 1에 나타내었다. 수치해석 결과 격자수가 108×108, 126×126일 때 비교 논문에서 제시한 고온 벽에서의 평균 Nusselt 수와 최대 오차 0.9% 내에서 일치하였다. 따라서 본 연구에서는 계산의 시간 효율성을 고려하여 108×108 격자수를 채택하여 모든 수치계산을 수행하였다. 계산에 필요한 시간은 Pentium 4 CPU 2.4 GHz에서 약 48시간 정도이다.

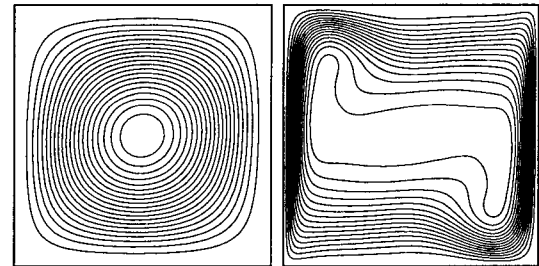
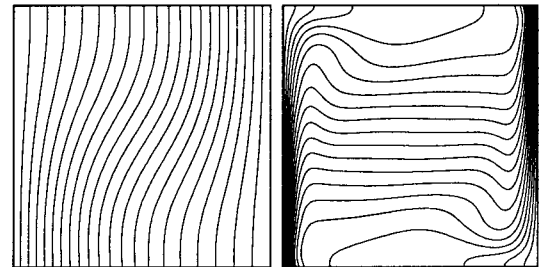
3. 결과 및 고찰

본 연구에서 주관심의 변수들로는 고체 삽입물의 폭 w , 고체 삽입물의 높이 h , 그리고 고체 삽입물과 유체의 열전도율의 비 λ 이다. 여기에서 유체는 Pr=0.71, Ra=10³, 10⁶으로 고정하였다. 또한 $w/H=0.01 \sim 0.7$, $h/H=0.1 \sim 0.7$, $\lambda=0 \sim 3688.21$ ($k_s=0 \sim 97$ W/mK) 범위에서 계산을 수행하였다.

Fig. 2는 밀폐공간 안에 고체 삽입물이 없을 경

우의 유선과 등온선으로 Ra=10³일 경우 상대적으로 자연대류보다 전도의 영향이 커서 등온선이 거의 수직으로 분포됨을 알 수 있다. Ra=10⁶일 경우에는 좌우 벽면에서의 온도차에 의해 형성된 강한 유동장의 영향으로 밀폐공간 중심부에는 안정된 온도 성층화 형태를 보인다.

Fig. 3은 밀폐공간 안에 고체 삽입물이 있을 경우의 계산격자를 나타낸다. 이때 고체 삽입물은

(A) Ψ (B) θ 

$$\Psi_{\max} = 1.49 \times 10^{-6}$$

$$\Delta\Psi = 0.079$$

$$\Delta\theta = 0.048$$

$$(a) \text{ Ra} = 10^3$$

$$\Psi_{\max} = 6.23 \times 10^{-6}$$

$$\Delta\Psi = 1.126$$

$$\Delta\theta = 0.048$$

$$(b) \text{ Ra} = 10^6$$

Fig. 2 Stream lines and isotherms without a solid insert ($\lambda=220.53$).

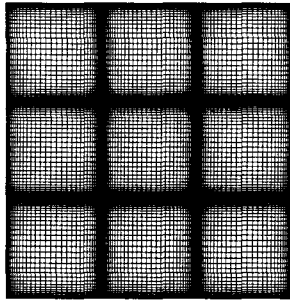


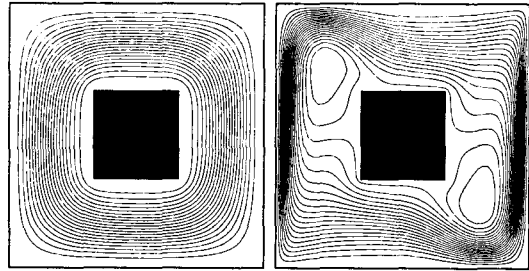
Fig. 3 Grid network of the enclosure with a solid insert.

밀폐공간의 높이와 폭의 각각 1/3의 일정한 길이를 가지며 밀폐공간 정 가운데에 위치하도록 하였다. 그리고 고체 삽입물 벽면에서의 유동 및 열 경계층을 해석하기 위해서 고체벽 경계에서도 조밀한 격자계를 사용하였다.

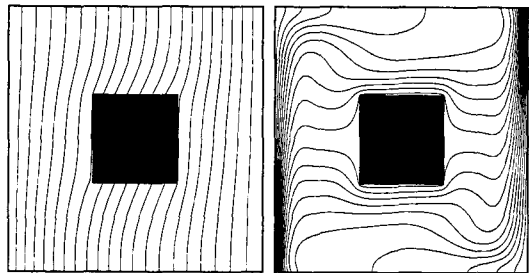
Fig. 4는 $\lambda=220.53$ ($k_s=5.8$ W/mK)일 때의 유선과 등온선을 나타내며 Fig. 2의 고체 삽입물이 없을 경우와의 비교하면, $Ra=10^3$ 일 경우의 등온선은 고체 삽입물의 주위에서 약간 온도분포가 왜곡됨을 알 수 있다. $Ra=10^6$ 일 경우는 $Ra=10^3$ 때보다 중앙부에서 성층화가 더욱 약화됨을 알 수 있다. 이것은 고체 삽입물의 높은 열전도율에 의해 밀폐공간 내부의 온도분포가 영향을 받는다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 $w/H=0.33$, $h/H=0.33$ 인 고체 삽입물이 존재할 경우, 열전도율의 비에 따른 성층화 비(R_s)의 그래프이다. $Ra=10^3, 10^6$ 모두 고체 삽

(A) Ψ



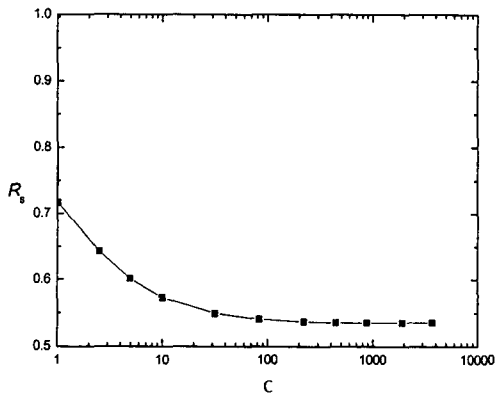
(B) θ



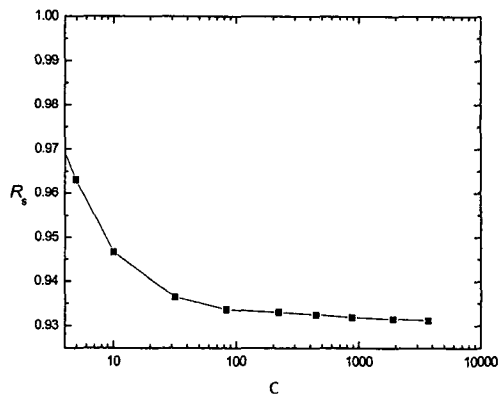
$\Psi_{\max} = 1.25 \times 10^{-6}$	$\Psi_{\max} = 5.97 \times 10^{-6}$
$\Delta\Psi = 0.037$	$\Delta\Psi = 1.126$
$\Delta\theta = 0.048$	$\Delta\theta = 0.048$
(a) $Ra=10^3$	(b) $Ra=10^6$

Fig. 4 Streams lines and isotherms with a solid insert at $\lambda=220.53$.

입물의 열전도율이 증가함에 따라 성층화 비는 감소하는데, 열전도율의 비가 약 $\lambda \approx 10^3$ 정도가 되면 성층화 비(R_s)는 더 이상 감소하지 않고



(a) $Ra=10^3$



(b) $Ra=10^6$

Fig. 5 Effect of thermal conductivity ratio on stratification factor at $w/H=0.33$, $h/H=0.33$.

일정한 것을 알 수 있다. 즉, 더 큰 열전도율을 갖는 고체 삽입물이 존재하여도 밀폐공간 내부의 온도 성층화에는 거의 영향을 주지 못하게 된다. 고체 삽입물이 없을 경우에 $Ra=10^3$ 일 때는 전도의 영향이 지배적이어서 등온선이 수직으로 분포하고 상하 온도차가 작아 $Ra=10^6$ 일 경우보다 상대적으로 성층화 비의 감소가 크다. 그렇지만 대류가 지배적인 $Ra=10^6$ 일 경우에는 고체 삽입물의 영향이 상대적으로 작아 성층화 비의 감소가 약 7%로 나타났다.

Fig. 6은 고체 삽입물의 높이는 밀폐공간의 높이의 1/3으로 일정하고 폭을 변화시킨 경우 열전도율의 비에 대한 성층화 비(R_s)를 도시한 것이

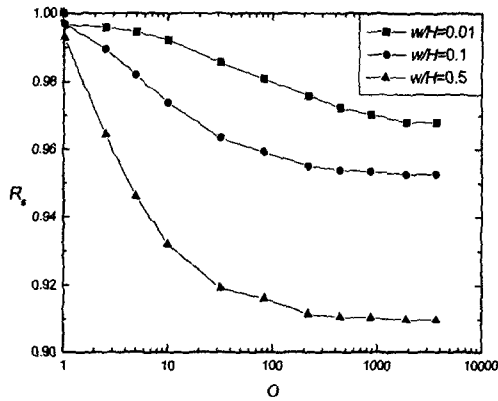


Fig. 6 Effect of thermal conductivity ratio on stratification factor for various widths of solid insert at $Ra=10^6$.

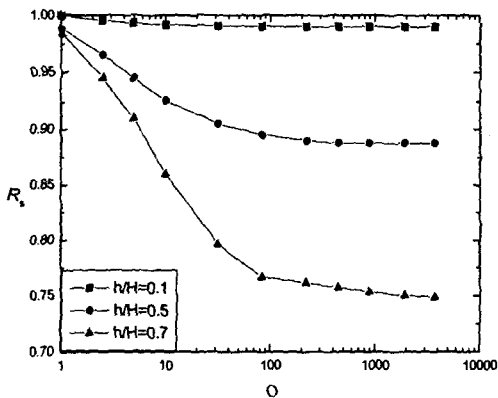


Fig. 7 Effect of thermal conductivity ratio on stratification factor for various heights of solid insert at $Ra=10^6$.

다. 이때, 고체 삽입물의 폭은 $w/H=0.01\sim0.5$ 을 선택하였다. 고체의 폭에 관계없이 열전도율의 비가 증가함에 따라 R_s 는 감소하며 임계값 $\lambda \approx 10^3$ 을 지나서는 더 이상 크게 감소하지 않고 일정함을 보이고 있다. 또한 고체 삽입물의 폭이 커짐에 따라 같은 열전도율의 비에서 성층화 비가 더욱 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 고체 삽입물의 폭을 밀폐공간의 폭의 1/3으로 고정시키고 높이를 $h/H=0.1\sim0.7$ 으로 변화시킨 경우 열전도율의 비에 따른 성층화 비를 나타낸다. $h/H=0.1\sim0.7$ 으로 선택한 것은 고체 삽입물의 높이에 대해 성층화 비의 전반적인

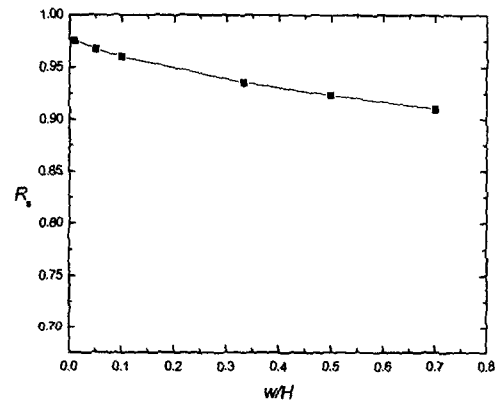


Fig. 8 Effect of width of a solid insert on stratification factor at $Ra=10^6$, $\lambda=220.53$, $h/H=0.33$.

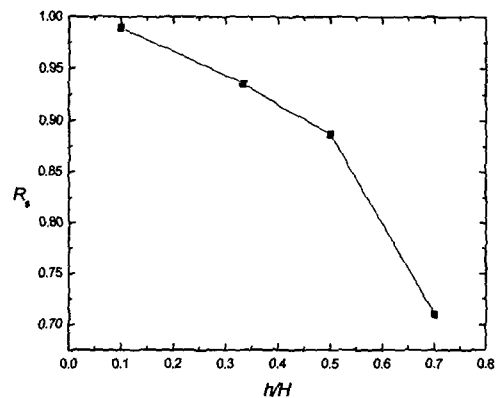


Fig. 9 Effect of height of a solid insert on stratification factor at $Ra=10^6$, $\lambda=220.53$, $w/H=0.33$.

변화를 알기 위해 선택한 것이다. 고체 삽입물의 폭을 변화시킨 경우와 마찬가지로 열전도율의 비가 증가함에 따라 R_s 는 감소하며 고체 삽입물의 높이가 변하여도 임계값 $\lambda \approx 10^3$ 을 지나서는 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

고체 삽입물의 폭과 높이의 영향을 나타낸 Fig. 8과 Fig. 9를 비교해 보면 $w/H=0.7$ 일 때 R_s 가 0.91이고, $h/H=0.7$ 일 때 R_s 는 0.7이다. 즉, 고체 삽입물의 폭을 증가시킨 것보다 같은 비율로 높이를 증가시키는 것이 온도 성층화를 크게 약화시킴을 의미하고 있다.

밀폐공간 내부의 온도 성층화는 수직 방향으로 형성되는 것이므로 수직 방향으로 확장된 길고 전도도가 큰 고체 삽입물이 수평 방향으로 확장된 고체 삽입물보다 강한 효과가 있다.

결과적으로 밀폐공간 내부의 열 성층화를 약화시키기 위해서는 폭보다는 높이가 큰 고체 삽입물이 유리하며, 열전도율의 비가 증가할수록 유리하지만 임계값 $\lambda \approx 10^3$ 이상의 고 열전도율 재료를 사용하더라도 열 성층화를 더 이상 약화시킬 수 없다.

4. 결 론

공기로 채워진 정사각형 밀폐공간 내에 1개의 고체 삽입물이 존재하는 경우, 고체 삽입물의 열전도율, 폭, 높이를 변화시키면서 수치해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고체 삽입물의 열전도율을 변화시킨 경우, $Ra=10^3, 10^6$ 모두 열전도율의 비가 증가함에 따라 성층화 비는 감소하였다. 그러나 임계값 $\lambda \approx 10^3$ 이상으로 열전도율의 비가 증가하면 성층화 비는 더 이상 감소하지 않고 일정하였다.

(2) 고체 삽입물의 높이는 일정하고, 고체 삽입물의 폭을 변화시킨 경우, 폭이 증가함에 따라 성층화 비는 최대 약 9%까지 감소하였다.

(3) 고체 삽입물의 폭은 일정하고, 고체 삽입물의 높이를 변화시킨 경우, 높이가 증가함에 따라

성층화 비는 최대 약 30%까지 감소하였다.

(4) 고체 삽입물의 폭이나 높이를 변화시킨 경우에, 열전도율의 비가 임계값 $\lambda \approx 10^3$ 이상이 되면 성층화 비는 감소하지 않고 거의 일정하게 유지되었다.

후 기

본 연구는 국민대학교 2003년도 교내 연구비의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Nansteel, M. W. and Grief, R., 1981, Natural convection in undivided and partially divided rectangular enclosures, *Trans. ASME of Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 623-629.
2. Emery, A. F., 1983, Exploratory studies of free convection heat transfer through an enclosed vertical liquid layer with a vertical baffle, *Trans. ASME of Heat Transfer*, Vol. 91, pp. 163-165.
3. Exeter, M. K., Hay, N. and Webster, J. J., 1982, Finite element solutions for free convection flow around and LMFBR debris tray, *Int. Heat Mass Transfer*, Vol. 25(7), pp. 999-1011.
4. House, J. M., Beckermann, C. and Smith, T. F., 1990, Effect of a centered conducting body on natural convection heat transfer in an enclosure, *Num Heat Transfer, Part A*, Vol. 18, pp. 213-225.
5. de Vahl Davis, G., 1983, Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution, *Int. J. Num Methods Fluids*, Vol. 3, pp. 249-264.
6. Ple, Q., 1991, Accurate solutions to the square thermally driven cavity at high Rayleigh number, *Comput. Fluids*, Vol. 20, pp. 29-41.