

# 열전도 물체가 존재하는 캐비티내 자연대류 열전달에 대한 수치적 연구

명 현 국<sup>\*1</sup>, 전 태 현<sup>2</sup>

## NUMERICAL STUDY ON NATURAL CONVECTION HEAT TRANSFER IN A CAVITY CONTAINING A CENTERED HEAT CONDUCTING BODY

H. K. Myong and T. H. Chun

*The present study numerically investigates the natural convection heat transfer in a 2-D square cavity containing a centered heat conducting body. Special emphasis is given to the influences of the Rayleigh number, the dimensionless conducting body size, and the ratio of the thermal diffusivity of the body to that of the fluid on the natural convection heat transfer in overall concerned region. The analysis reveals that the fluid flow and heat transfer processes are governed by all of them. Results for isotherms, vector plots and wall Nusselt numbers are reported for  $Pr = 0.71$  and relatively wide ranges of the other parameters. Heat transfer across the cavity, in comparison to that in the absence of a body, are enhanced (reduced) in general by a body with a thermal diffusivity ratio less (greater) than unity. It is also found that the heat transfer attains a minimum as the body size is increased with a thermal diffusivity ratio greater than unity.*

**Key Words:** 복합 열전달(Conjugate Heat Transfer), 자연대류(Natural Convection), 열전도 물체(Heat Conducting Body), 수치적 연구(Numerical Study), 열확산비(Thermal Diffusivity Ratio)

### 1. 서 론

2차원 사각 공간내의 자연대류문제는 공학적인 중요성 때문에 상당한 주목을 받고 있다. 따라서 2차원 사각 캐비티내의 순수한 자연대류 문제는 Cheesewright 등[1]의 실험결과와 Davis[2] 및 Hortmann 등[3]에 의한 수치해석 결과가 제시된 후, 여러 연구자들에 의해 다각적인 수치해석이 이루어졌으며 현재도 새로운 수치해석방법의 중요한 검증문제로 인식되게 되었다. 이와 더불어, 밀폐된 기계장치 내부에서나 구조물의 내부에서와 같이 고체와 액체(유체)가 같이 존재하며 열전도를 가진 고체가 열전달에 영향을 미치는 복합 열전달(conjugate heat transfer) 해석이 요구되는 문제도 우리 주변에

서 많이 볼 수 있다. 그러나 기존의 연구는 일반적으로 내부에 존재하는 물체를 열전도 물체가 아닌 부도체인 장애물로 보고 불록으로 처리하고 있다.

한편, 지난 십 수 년에 걸쳐 비정렬격자계(unstructured grid system)를 사용하는 유한체적법이 CFD 연구 분야에서 주목을 받고 있는데, 비정렬격자계를 사용하는 경우 복합열전달 해석에서 고-액이 만나는 계면에서의 연속성 문제를 처리하는 방법이 매우 중요하다. 이것은 계면에서는 단지 온도가 한 가지 값만을 갖고, 열속이 보존된다는 조건만을 사용하여야 하는데, 1차원 및 직각격자계에서는 조화평균한 열전도계수가 위의 조건을 만족하지만 경계밀착 격자(비직교격자)나 비정렬격자계에서는 계면에서 두 셀 중심을 잇는 벡터가 일반적으로 계면과 직교하지 않기 때문에 단순한 1차원적 식을 사용할 수 없고, 격자의 비직교에 의한 교차확산을 고려해 주어야만 하기 때문이다.

House 등[4]은 2차원 정사각형 캐비티 중앙에 위치하는 열전도 물체가 자연대류에 어떠한 영향을 미치는지를 수치해석

접수일: 2005년 5월23일, 심사완료일: 2005년 8월22일.

1 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

2 정회원, 한국원자력연구소

\* Corresponding author E-mail: myong@kookmin.ac.kr

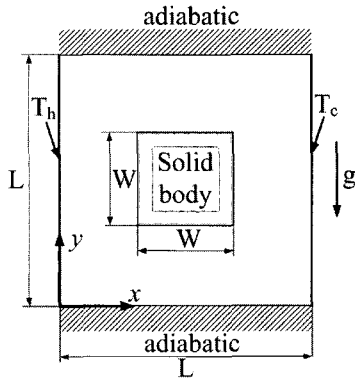


Fig. 1 Schematic diagram of cavity with a centered solid body

적으로 파악하고, 검증용해(benchmark solution)를 제시하였다. 이들은 정렬 직각격자계를 사용하고 유동 영역 내에 존재하는 고-액 경계면에서의 연속성 문제를 해결하기 위하여 확산 계수에 대해 조화평균 형태를 취하였다. 따라서 이 문제는 고-액 경계면 처리에 대한 수치해석방법의 타당성을 알아보기 위한 검증 문제로도 활용될 수 있다.

본 연구에서는 최근 비정렬격자계를 사용하는 복합열전달 해석에서 사용될 수 있도록 새롭게 제안된 고-액 계면 처리방법[5]을 비정렬격자계를 사용하고 압력수정방법에 기반을 두고 자체적으로 개발한 코드(PowerCFD)[6,7]에 접목시켜, House 등[4]의 연구에서와 같이 열전도 물체가 존재하는 2차원 캐비티내에서의 복합 열전달 문제를 대상으로 유체유동과 열전달 과정에서 지배적 인자인 Rayleigh수  $Ra$ , 무차원 열전도 물체의 크기  $\zeta$ 와 유체 열확산 계수에 대한 열전도 물체의 열확산 계수의 비  $\alpha^*$  등과 같은 매개변수들에 대한 영향을 수치해석적 방법을 통하여 알아본다. 또한, 기존의 검증용 해인 수치해석 값들과 비교분석을 통하여 본 연구에서 사용한 코드의 적합성과 타당성을 검증한다.

## 2. 수치해석

Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 한 모델을 간단하게 나타낸 것으로, 왼쪽 벽면에 높은 온도  $T_h$ 가, 오른쪽 벽면에 상대적으로 낮은 온도  $T_c$ 가 주어지고 위아래 벽면은 단열되어 있으며, 내부 중심에 열전도 물체가 놓여 있다.

본 연구에서 사용한 코드는 자체 개발한 코드(PowerCFD) [6,7]로 이 코드는 복잡하고 실제적인 형상에 대한 격자생성이 용이하고, 흥미 있는 국부 형상에 대해 격자를 능동적으로 적용시킬 수 있는 능력을 가지고 있는 비정렬격자계를 사용하고 유한체적법에 기초하여 열/유체 유동 문제를 해석할 수

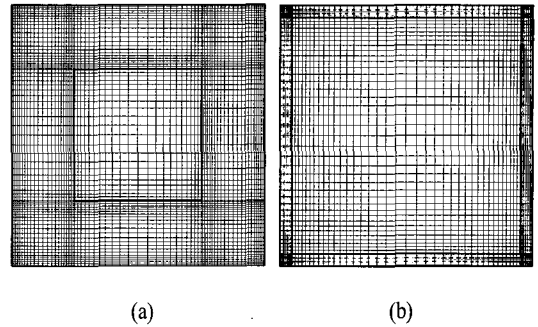


Fig. 2 Segments of the grids for ; (a) cases 1 & 2 , (b) cases 3 & 4

있는 3차원 해석 알고리즘을 사용하고 있다. 즉, 기본적으로 열/유체 유동 현상을 지배하는 지배방정식(연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식과 같은 스칼라량에 대한 지배방정식)을 풀기 위해 현재 대부분의 상용 CFD 해석 소프트웨어에서 채택하고 있는 일반좌표계를 사용하고 유한체적법에 기초하여 벡터와 스칼라 값을 모두 제어체적의 중심점에 위치시키는 집중격자계를 사용하며, 미소체적 중심에서의 직교좌표 성분의 속도, 압력 및 스칼라 성분을 주요 종속변수로 채택하고 있다. 또한, 운동량 방정식의 압력항 처리를 위하여 연속 방정식의 속도와 연관시킨 SIMPLE계통 알고리즘을 비정렬격자계에 적용시켜 압력수정방정식을 얻는 방법을 확립시켰다. 특히, 본 코드는 대류항 및 확산항을 이산화하기 위해 필요한 셀 면에서의 종속변수  $\phi$  값 및 그 구배  $\nabla\phi$  값을 Gauss 정리(발산정리)를 이용하여 구하며, 또한 불규칙적이고 여러 가지 형상을 가지는 격자에서도 2차 정확도를 가지면서도 용이하게 코드에 접목시켜 사용할 수 있는 새로운 확산플럭스 근사방법[8]이 채택되었다. 마지막으로 선형화된 방정식의 해를 얻기 위해 CG(Conjugate Gradient) 방법 계통의 대수 솔버가 사용되었다.

계산에 사용된 지배방정식은 무차원화된 2차원 층류 N-S 방정식과 에너지 방정식으로, 이들 식을 풀기 위해 대류항 계산에는 상용 CFD 코드에서 널리 사용되고 있는 2차 정확도를 가지는 중심차분법을 사용하였다.

Table. 1에는 본 연구에서 고려하는 중요한 무차원 변수들

Table. 1 Dimensionless Parameters for Vector and Isotherm Plots, where  $Ra (= g\beta\Delta TL^3/\nu\alpha)$

Case	$Ra$	$\zeta$ (=W/L)	$\alpha^*$ (= $\alpha_s/\alpha_f$ )
1	$10^5$	0.5	0.1
2	$10^5$	0.5	10.0
3	$10^6$	0.9	0.1
4	$10^6$	0.9	10.0

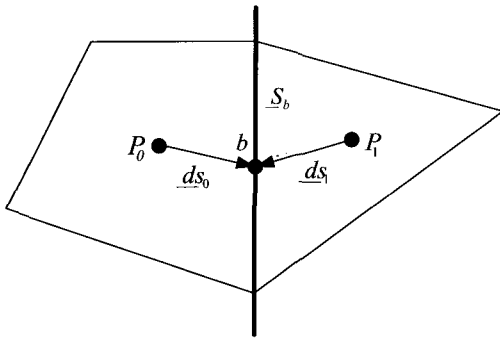


Fig. 3 Control volumes adjacent to interface

을 Case 별로 나타내었으며, 계산을 위하여 사용한 격자계는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 종속변수 구배값이 큰 벽면 및 고체와 유체가 만나는 내부 열전도 물체와의 경계면 근방에 조밀하게 만들어진 비등간격 사각격자를 사용하였다. 단, 검증용 해와의 비교를 위해 모든 계산에서  $Pr = 0.71$ 로 하였다.

한편, 본 연구에서는 비록 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 직각 격자를 사용하나 조화평관을 사용하지 않고, 격자의 비직교에 의한 이차 (또는 교차) 확산항(secondary or cross diffusion term)을 고려하고 비정렬격자계에도 사용될 수 삽입시켜 사용하였다. 즉, 이 방법은 주구배항(primary gradient term) 값으로 계면에 접한 두 인접 셀 중심을 잇는 직선  $ds_j$  방향의  $dT$  는 사용하고, 계면에서의 온도구배( $\nabla T$ )<sub>b</sub>의 나머지 성분, 즉 셀면의 접선방향의 이차 구배항 값은 두 셀 중심에서 구한  $\nabla T$  를 거리 가중평균하여 사용하는 방법으로, 최근 명[8]이 제안한 경계면에서의 확산항 처리방법과 유사하며, Fig. 3에 나타낸 고-액 계면에 대해 일반적으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$q_{b0} = k_0 \frac{S_b}{ds_0 \cdot \hat{n}} (T_b - T_{P_0}) + k_0 \nabla T_{P_0} \cdot \underline{S}_b - (\nabla T_{P_0} \cdot \underline{ds}_0) \frac{S_b}{ds_0 \cdot \hat{n}} = h_0 (T_b - T_{P_0}) + S_0 \quad (1)$$

$$q_{b1} = k_1 \frac{S_b}{ds_1 \cdot (-\hat{n})} (T_b - T_{P_1}) + k_1 \nabla T_{P_1} \cdot (-\underline{S}_b) - (\nabla T_{P_1} \cdot \underline{ds}_1) \frac{S_b}{ds_1 \cdot (-\hat{n})} = h_1 (T_b - T_{P_1}) + S_1 \quad (2)$$

위식에서  $\nabla T_{P_0}$  및  $\nabla T_{P_1}$ 은 각각 점  $P_0$  및  $P_1$ 에서의 온도 구배의 근사값으로 점을 포함하는 셀에 대해 가우스정리를

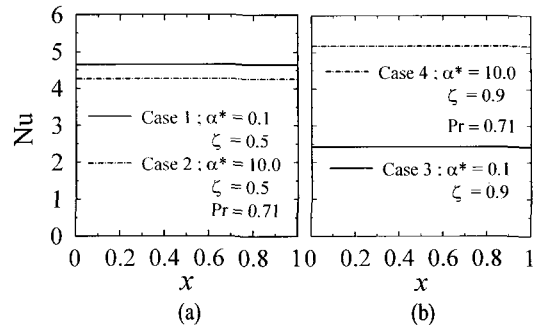


Fig. 4 Average Nusselt number through any line parallel to the  $y$ -axis for (a) case 1 and 2, (b) case 3 and 4

사용하여 구해진다. 그런데 위식에서  $q_{b0}$ 는 계면의 왼쪽 셀에서  $S_b$  방향의 열속이며,  $q_{b1}$ 은 오른쪽 셀에서  $-S_b$  방향의 열속이므로  $q_{b0} = -q_{b1}$  이 된다. 따라서

$$h_0 (T_b - T_{P_0}) + S_0 = h_1 (T_{P_1} - T_b) - S_1 \quad (3)$$

위식을 정리하면 계면에서의 온도와 열플럭스를 다음과 같이 용이하게 CFD 코드에 접목시켜 사용할 수 있는 식 형태로 구할 수 있다.

$$q_b = \frac{h_0 h_1}{h_0 + h_1} (T_{P_1} - T_{P_0}) + \frac{h_0 S_1 - h_1 S_0}{h_0 + h_1} \quad (4)$$

$$T_b = \frac{h_0 T_{P_0} + h_1 T_{P_1}}{h_0 + h_1} - \frac{S_0 + S_1}{h_0 + h_1} \quad (5)$$

### 3. 결과 및 고찰

먼저 수치계산의 정확성을 확인하기 위하여 Table. 1의 각 Case에 대해  $x$  축을 따라  $y$  축에 평행한 모든 선에 대한 평균 Nusselt수  $Nu$  를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서,  $Nu$  는 Hortmann 등[3]에서의 정의와 같이 캐비티를 좌우로 가로지르는 실제 열플럭스(유속)를 순수전도로부터 얻어지는 열플럭스로 나눈 값으로 정의되며, 실제 열플럭스는  $x$ 가 일정한 격자라인을 따라 제어체적면을 통과하는 대류 및 확산 플럭스를 합한 값으로 구해진다. Fig. 1의 조건하에서 유한체적법 고유의 보존성 때문에, 평균 Nusselt 수(또는 열플럭스)는  $x$ 가 일정한 모든 라인에서 벽에서의 평균 Nusselt수와 같아야 하나, 기존의 순수자연대류에 관한 de Vahl Davis[2] 등의 연구에서는 벽면 근처에서 격자에 의존하여 평균 Nusselt수가 변한다고

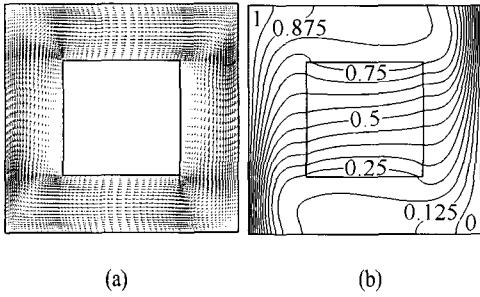


Fig. 5 Predicted results for case 1. (a) vector plot and (b) isotherms.

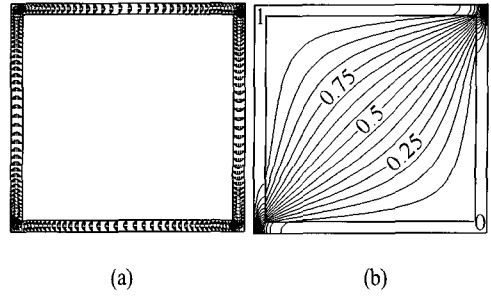


Fig. 7 Predicted results for case 3. (a) vector plot and (b) isotherms.

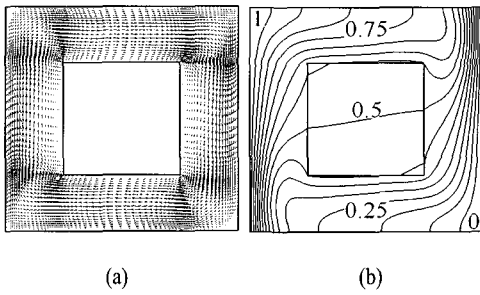


Fig. 6 Predicted results for case 2. (a) vector plot and (b) isotherms.

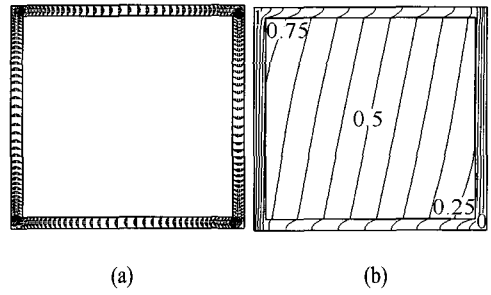


Fig. 8 Predicted results for case 4. (a) vector plot and (b) isotherms.

보고하고 있어 수치계산의 정확도면에서 문제점을 제시하고 있다. 그러나 본 코드의 결과는 Fig. 3에서 보는 바와 같이  $x$ 가 일정한 모든 라인에서 같은 값을 가짐을 확인 할 수 있으며, 이것으로 본 연구에서 사용한 코드의 정확성을 확인할 수 있다.

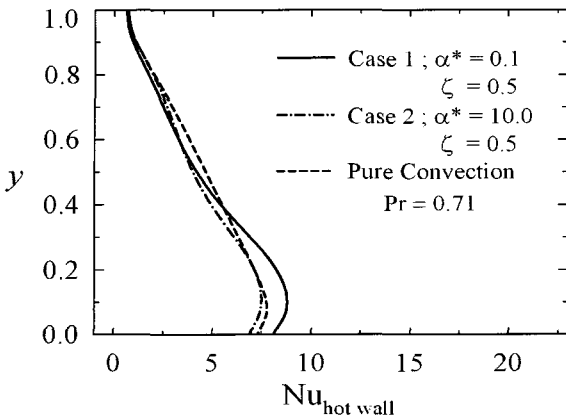
Table. 2에는 각 Case 및 열전도 물체가 없는 순수한 자연대류인 경우에 대한 벽면에서의 평균 Nusselt수 예측결과를 나타낸다. 순수한 자연대류인 경우, 본 예측결과를  $Ra = 10^6$  까지 검증용 해[9]와 최대 0.5% 이하의 오차를 나타내고 있어, House 등[4]의 1.5% 보다 더 일치된 결과를 보이고 있다. 또한, 표에는 제시하지 않았으나,  $Ra=10^5$ ,  $\zeta=0.5$ ,  $\alpha^*=0.2$ 인 경우 본 예측결과는  $Nu=4.6277$ 로 House 등[4]의 4.624와 거의 일치하고 있어, 본 연구에서 사용한 코드의 적합성과 타당성을 확인할 수 있다.

Table. 2 Comparison of the Averaged Nusselt Numbers predicted by PowerCFD Code.

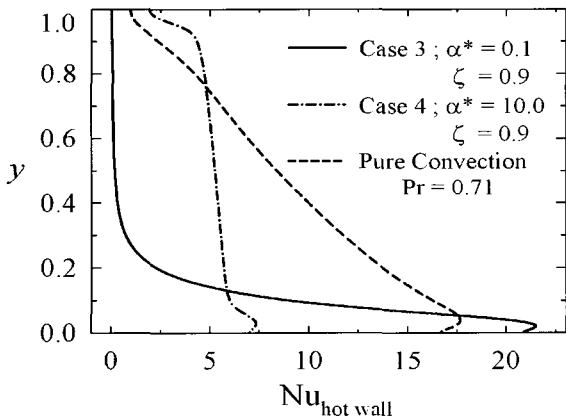
Case	$Nu$	
	Without Body	With Body
1		4.646
2	4.5294	4.256
3		2.4243
4	8.8466	5.1827

Fig. 5와 Fig. 6은 Table. 1에 정의되어진 Case 1과 2에 대해 예측된 벡터선도와 등온선도를 각각 보여준다. 등온선도에 나타난 값은 무차원 온도값이다. 여기서 Case 1과 2는 100배의 열확산 계수 면에서 100배 차이가 있으나, 두 벡터선도는 Fig. 5(a) 및 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 거의 유사하게 나타나고 있으며, 그림으로 제시하지는 않았으나 순수 자연대류에서의 벡터선도와 비교해 보아도 열전도 물체가 크게 유동에 영향을 미치고 있지 않음을 확인할 수 있다. 이것은 이 Rayleigh수의 순수자연대류에서는 유체영역의 중심부분에 거의 정체된 영역이 형성되기 때문으로 이 경우 물체의 존재가 유동장에 크게 영향을 미치지 않는다고 사료되며, 이러한 사실은 Table. 2에 제시한 각각의 경우에 대한 Nusselt수를 비교함으로써도 확인할 수 있다.

한편, Table. 2에 나타난 것과 같이 Case 1과 2에서의 Nusselt수와 열전도 물체가 존재하지 않는 순수 자연대류에서의 Nusselt수는 거의 차이가 없으나, Case 1과 2에서 열전도 물체의 열확산 계수가 증가할수록 평균 Nusselt수가 감소하는 것은 상대적으로 전도에 의한 열전달이 그만큼 증가했다는 것을 의미한다. 즉, Fig. 5(b) 및 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 Case 1과 2 모두 열전도 물체 내부에서 등온선도는 수평면과 거의 평행한데 이것은 상부의 수평 유로를 지나는 높은 온도의 유체와 하부의 수평 유로를 지나는 낮은 온도의 유체사이



(a)



(b)

Fig. 9 The distributions of local Nusselt number along the hot wall for (a) case 1 and 2, (b) case 3 and 4.

에 열전도 현상이 열전도 물체를 통해 수직적으로 일어남을 의미하며, 열확산비  $\alpha^*$  가 1보다 큰 Case 2인 경우(Fig. 6(b))는 높은 열확산율을 가진 열전도 물체가 지름길과 같은 열확산통로의 역할을 하여 결과적으로 밀폐된 공간에서 온도가 다른 두 벽 사이에서의 자연대류에 의한 열확산 현상을 감소시킬 수 있다. 반면, 열확산비가 작은 Case 1인 경우는 열전도 물체가 부도체와 같이 작용하여 수평적으로 흐르는 유동이 온도가 다른 두 벽 사이에서 더 효과적으로 열을 전달하므로 순수 자연대류인 경우보다 다소 높은 Nusselt수를 가지게 된다. 이러한 열전달 및 유체유동에 대한 복합적인 효과로 인해 캐비티 열전달은 열전도 물체 크기가 유동 중심부의 정체영역 정도의 크기에서는 열확산비  $\alpha^* < 1$ 인 경우 순수 자연대류에 비해 증가할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 Table. 1에 정의되어진 Case 3과 4에 대

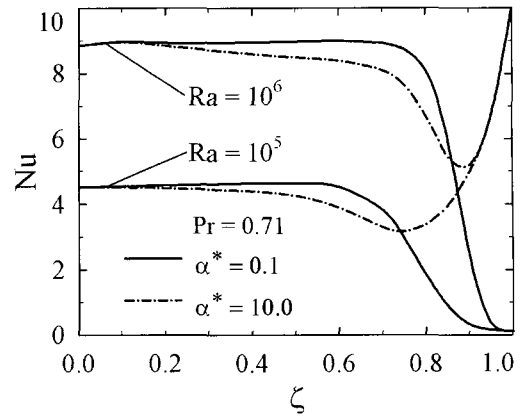


Fig. 10 Effect of Rayleigh number and thermal diffusivity ratio on average Nusselt number.

해 예측된 벡터선도와 등온선도를 보여준다. 이 경우 상대적으로 큰 열전도 물체의 영향으로 자연대류는 Case 1과 2에 비하여 매우 약하다. 또한, 벡터선도는 두 경우가 유사한 분포를 가지나, 등온선도에서는 상이한 열확산비를 가지는 열전도 물체의 영향이 눈에 띄게 다른 특징을 만들어냄을 확인할 수 있다. 즉, Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이  $\alpha^* = 0.1$ 인 경우 유체영역에서의 등온선은 상부 오른쪽 모서리와 하부 왼쪽 모서리에 집중되어 있음을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 Case 1에서와 마찬가지로 1보다 작은 열확산비를 가지는 열전도 물체가 부도체와 같은 역할을 하나, 왼쪽 아래 모서리 부분과 오른쪽 위쪽 모서리 부분에서 모서리를 가로지르는 열저항이 전체 열전도 물체를 대각선으로 가로지르는 열저항보다 매우 작기 때문에 열확산이 쉽게 일어나, 결과적으로 이 열전도에 의해 아래쪽 통로의 찬 유체는 뜨거운 벽에 도달할 때 이미 상당히 가열되고, 반대로 위쪽 통로의 뜨거운 유체는 찬 벽에 도달할 때 이미 상당히 냉각된다는 사실로 설명이 된다. 또한, Fig. 7(b)의 등온선도를 통해서 양측 수직 유로에서 유체가 열전도 물체를 통해서 연고 잃는 열은 거의 정확하게 수직 등온 벽으로부터 연고 잃는 열과 일치함을 확인할 수 있다. 비록, 밀폐된 공간 전체에 걸친 열전달량이 거대한 크기의 열전도 물체를 가로지르는 전도를 통하여 지배되어 어지지만, 유체는 밀폐공간의 왼편 아래 모서리에서 오른편 상부 모서리로 열을 이류시킴으로 열전달을 증대시킨다. 따라서 Nu수는  $\alpha^* = 0.1$ 의 순수전도일 때의 Nusselt수 값보다 상당히 큼을 알 수 있다(Fig. 10 참조).

반면,  $\alpha^* = 10.0$ 일 때의 등온선도(Fig. 8(b))는 유체가 실제로 밀폐된 공간을 가로지르는 열을 거의 이류시키지 못하고, 열전달은 양측 수직 통로와 열전도 물체를 수평으로 가로지르는 열전도에 의해 지배적으로 이루어짐을 알 수 있

며, 수치 유로에서 유체의 큰 열저항으로 인하여 Nusselt수는  $\alpha^* = 10$ 의 순수전도일 때의 Nusselt수보다 상당히 작음을 알 수 있다(Fig. 10 참조).

Fig. 9는 뜨거운 벽면에서의 각 Case에 대한 국소 Nusselt수를 나타낸 것으로, 앞에서 등온선도와 벡터선도로부터 중심에 위치한 열전도 물체의 영향에 대해 확인한 사실들을 다시 한번 입증하고 있다. 즉, Case 1 및 2인 경우 벽면에서의 국소 Nusselt수 형태가 순수 자연대류의 경우와 크게 차이하지 않으나, Case 3 및 4인 경우 열전도 물체의 영향이 국소 Nusselt수에 있어서 눈에 띄게 다른 형태를 보여 주고 있다.

Fig. 10은 무차원 열전도 물체의 크기에 대한 Nusselt수의 관계를  $Ra=10^5$ ,  $10^6$ 과  $\alpha^* = 0.1, 10.0$ 에 대하여 그래프로 나타낸 것이다. 먼저, 물리적으로 충분히 예상되는 바와 같이 그림에서  $\zeta = 0$ 일 때는 순수 자연대류인 경우로 Nusselt수 값은 열확산비에 관계없이 Rayleigh수에만 의존하는데 반해,  $\zeta = 1$ 일 때는 순수 열전도인 경우로 Rayleigh수에 관계없이 열확산비에만 의존함을 나타내고 있다. 다음으로, 중심에 위치한 열전도 물체는 순수 자연대류인 경우의 정체영역의 크기까지는 전술한 바와 같이 자연대류 유동을 억압하지 않기 때문에 열확산비에 관계없이 상대적으로 유동 및 열전달에 거의 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한, 이 열전도 물체의 크기는 Rayleigh수가 증가할수록 다소 증가함을 나타내고 있는데, 이것은 Rayleigh수가 증가할수록 순수 자연대류 유동에서 정체영역의 크기도 증가하기 때문으로 설명할 수 있다.

한편, Fig. 10의 결과는  $\alpha^* = 0.1$ 인 경우 Nusselt수는 순수 자연대류의 Nusselt수를 다소 상회하다가 순수전도일 때의 Nusselt수로 단조 감소함을 나타내고 있다. Nusselt수가 최대값을 가지는 위치는 열전도 물체가 자연대류 유동을 크게 억압하지 않는 크기로, 이것은 앞의 Case 1인 경우에 상세히 기술한 바와 같이 열전도 물체가 부도체와 같이 작용하여 수평적으로 흐르는 유동이 온도가 다른 두 벽 사이에서 더 효과적으로 열을 전달하기 때문이며, 이 결과는 자연대류가 존재하는 밀폐공간에 열확산비가 낮은 열전도 물체를 밀폐공간의 중앙에 위치시키면 자연대류 열전달현상을 증가시킬 수 있음을 의미한다. 그러나  $\alpha^* = 10.0$ 인 경우의 결과는 열전도 물체의 크기가 자연대류 유동을 크게 억압하지 않는 크기까지는 Nusselt수가 순수 자연대류의 Nusselt수로부터 최대값을 갖지 않고 계속적으로 서서히 감소함을 나타내고 있는데, 이것은 앞의 Case 2인 경우에 상세히 기술한 바와 같이 높은 열확산율을 가진 열전도 물체가 지름길과 같은 열확산통로의 역할을 하여 결과적으로 자연대류에 의한 열확산 현상을 감소시키기 때문이다. 또한, 열전도 물체의 크기가 더 커지게 되면 자연대류 유동을 크게 억압하게 되므로 Nusselt수는 급격하게 떨어져 자연대류가 더 이상 중요하지 않은 시점에서 최소값

을 가진 후, 순수 열전도의 Nusselt수까지 증가하게 됨을 그림으로부터 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 비정렬격자계를 사용하는 복합열전달 해석에서 사용될 수 있도록 새롭게 제안된 고-액 계면 처리방법 [5]를, 비정렬격자계를 사용하고 압력수정방법에 기반을 두고 자체적으로 개발한 코드(PowerCFD)[6,7]에 접목시켜, House 등[4]의 연구에서와 같이 열전도 물체가 존재하는 2차원 캐비티내에서의 복합 열전달 문제를 대상으로 유체유동과 열전달 과정에서 지배적 인자인 Rayleigh수, 무차원 열전도 물체의 크기와 유체 열확산 계수에 대한 열전도 물체의 열확산 계수의 비 등과 같은 매개변수들에 대한 영향을 수치해석적 방법을 통하여 알아보았다. 또한, 기존의 검증용 해인 수치해석 값들과 비교분석을 통하여 본 연구에서 사용한 코드의 적합성과 타당성을 검증하였다. 연구결과,

- (1) 새롭게 제안된 고-액 계면 처리방법을 포함해 본 연구에서 사용한 PowerCFD코드의 수치해석방법의 적합성과 타당성이 입증되었다.
- (2) 중심에 위치한 열전도 물체의 크기가 순수 자연대류인 경우의 정체영역의 크기까지는 열확산비에 관계없이 상대적으로 유동 및 열전달에 크게 영향을 미치지 않으며, 이 열전도 물체의 크기는 Rayleigh수가 증가할수록 다소 증가한다.
- (3) 자연대류가 존재하는 밀폐공간에 열확산비가 낮은 (또는 큰) 열전도 물체를 밀폐공간의 중앙에 위치시키면 자연대류 열전달현상을 증가(또는 감소)시킬 수 있음이 확인되었다.
- (4) 상대적으로 큰 고체블록인 경우 열확산비에 따라 등온선도 및 국소 Nusselt 수 형태에서 크게 다른 특징을 나타내는 것이 확인되었다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기연구개발사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 대해 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Cheeswright, R., King, K.J. and Ziai, S., 1986, "Experimental Data for the Validation of Computer Codes for the Prediction of Two-Dimensional Buoyant Cavity Flows," *ASME HTD Winter Annual Meeting*, Vol.60,

- p.75-81.
- [2] de Vahl Davis, G., 1983, "Natural Convection of Air in a Square Cavity : A Bench Mark Numerical Solution," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol.3, p.249-264.
- [3] Hortmann, M., Peric, M. and Scheuerer, G., 1990, "Finite Volume Multigrid Prediction of Laminar Natural Convection : Benchmark Solutions," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol.11, p.189-207.
- [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," *Numer. Heat Transfer, Part A*, Vol.18, p.213-225.
- [5] 명현국, 유경훈, 2005, "비정렬격자계를 사용하는 복합 열 전달 해석에서의 계면 처리방법," *대한설비공학회 2005 하계학술발표대회 논문집*, p.742-747.
- [6] 명현국, 2004, "원형실린더 주위의 비정상 이차원 층류유동 수치해석," *한국전산유체공학회지*, 제9권, 제4호, p.41-47.
- [7] 명현국, 김중태, 2005, "비정렬 격자계를 사용하는 3차원 유동해석코드 개발(제1편 수치해석방법)," *대한기계학회 논문집에 게재 예정*.
- [8] 명현국, 2005, "비정렬 셀 중심 방법에서 확산플럭스의 새로운 수치근사방법," *대한기계학회 논문집에 투고 중*.
- [9] Lankhorst, A.M., Hoogendoorn, C.J., 1988, "Three-Dimensional Numerical Calculations of High Rayleigh Number Natural Convective Flows in Enclosed Cavities," in: *Proc. of 1988 National Heat Transfer Conf.*, Heat Transfer Division, ASME, New York, p.463-470.