

경사진 3차원 캐비티내 자연대류현상에 관한 수치적 연구

명 현 국[†], 김 종 은*

국민대학교 기계·자동차공학부, *국민대학교 대학원 기계공학과

Numerical Study on Slanted Cubical-Cavity Natural Convection

Hyon Kook Myong[†], Jong Eun Kim^{*}

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

^{*}Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received March 22, 2006; revision received July 25, 2006)

ABSTRACT: Natural convection flows in a cubical air-filled slanted cavity that has one pair of opposing faces isothermal at different temperatures, T_h and T_c , respectively, the remaining four faces having a linear variation from T_c to T_h are numerically simulated by a solution code (PowerCFD) using unstructured cell-centered method. Special attention is paid to three-dimensional flow and thermal characteristics according to a new orientation (diamond type) for the cubical-cavity benchmark problem in natural convection. Comparisons of the average Nusselt number at the cold face are made with experimental benchmark solutions found in the literature. It is found that the code is capable of producing accurately the nature of the laminar convection in a cubical air-filled slanted cavity with differentially heated walls.

Key words: Numerical study(수치적 연구), Natural convection(자연대류), Slanted cubical cavity(경사진 3차원 정육면체 캐비티), Diamond type orientation(다이아몬드형 기울기), Rayleigh number(Ra수), Unstructured cell-centered method(비정렬 셀 중심 방법), Benchmark solution(검증용 해), Nusselt number(Nu 수)

기 호 설 명

- L : 캐비티의 폭 [m]
- Nu : Nusselt 수
- Ra : Rayleigh 수
- T : 온도 [K]
- x : 고온 벽으로부터의 거리 [m]
- y : y 축의 길이 [m]
- z : z 축의 길이 [m]

그 리 스 문 자

- α : 캐비티의 수평면에 대한 기울기 [$^{\circ}$]
- Θ : 수평면에 대한 캐비티 y 축의 기울기 [$^{\circ}$]
- ψ : 수평면에 대한 캐비티 z 축의 기울기 [$^{\circ}$]

1. 서 론

공기로 가득 찬 3차원 캐비티내에서의 자연대류현상은 전자 및 기계 부품의 냉각, 열에너지 저장시스템, 칸막이가 존재하는 공간들 사이에서 발생하는 화재 등과 같이 공학적인 측면에서 매우 중요하다. 따라서 단순한 기하학적 형상을 가지는 3차원 정육면체 캐비티내의 자연대류유동은

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4714; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: myong@kookmin.ac.kr

새로운 수치해석방법에 대한 타당성의 검증을 위해 적절한 기본적인 모델로 자주 제시되어진다.

수치해석적 연구를 살펴보면, Fusegi et al.⁽¹⁾은 온도가 다른 두 수직 벽을 가지는 3차원 캐비티 내에서 발생하는 유동의 형태와 특성을 언급하였고, Pallares et al.⁽²⁾은 온도가 다른 두 수평면을 가지는 3차원 캐비티내에서 유동형태와 특성을 기존의 연구결과들과 비교 검토하였다. 그런데 이 두 가지 연구 모두 온도가 서로 다른 두 벽면을 제외한 나머지 벽면들에 대해서는 완전 단열조건으로 주어졌다. 그러나 공기로 가득 찬 캐비티내에서는 수치해석을 위한 모델과 같이 실제실험에서 완벽하게 벽면을 단열시키는 것은 불가능하다.⁽¹⁻³⁾ 따라서 Leong et al.^(3,4)은 밀폐된 3차원 캐비티내에서 발생하는 자연대류현상을 이해하기 위해 물리적으로 타당한, 즉 실험적인 방법으로 실험이 가능한 검증용 해(benchmark solution)로 두 개의 서로 다른 온도를 가지는 등온 벽과 그 외 나머지 네 측면의 벽이 높은 온도 벽으로부터 낮은 온도 벽까지 선형온도분포(Linear Temperature Profile, LTP)를 가지는 등온조건을 경계조건으로 사용하여, 공기로 가득 찬 3차원 캐비티내의 자연대류 유동현상을 실험과 함께 수치해석한 결과를 제시하였다. 특히, 이들은 캐비티의 기울기를 세 가지 경우, 즉 $\theta=0^\circ$, 45° 및 90° 로 하여 수직방향으로 온도구배가 존재하는 Rayleigh-Benard 자연대류현상($\theta=0^\circ$ 인 경우)과 마주보는 두 개의 수직 벽 사이의 온도차로 인해 발생하는 정상상태 자연대류현상인 부력구동(buoyancy-driven) 유동문제($\theta=90^\circ$ 인 경우)를 포함하여, 이 두 현상이 혼합된 경우까지 포괄적으로 연구하였다. 참고로 Leong et al.⁽³⁾이 시행한 이 검증용 해는 2001년 개최된 ICHMT 2nd International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer에서 검증용 해로 선택되어 많은 연구자들에 의해 논의되었다.

최근, Myong^(5,6)은 비정렬 셀 중심 방법을 채택하고 있는 3차원 유동해석코드(PowerCFD)^(7,8)를 사용하여 Leong et al.^(3,4)이 실험한 3차원 정육면체 캐비티내 자연대류 열전달 문제를 수치해석하고, 검증용 해와 비교분석을 통해 코드의 적합성과 함께 캐비티의 기울기가 자연대류 열전달을 증가(또는 감소)시킬 수 있으며, 자연대류 열전달이 가장 높게 나타나는 기울기를 제시하였다.

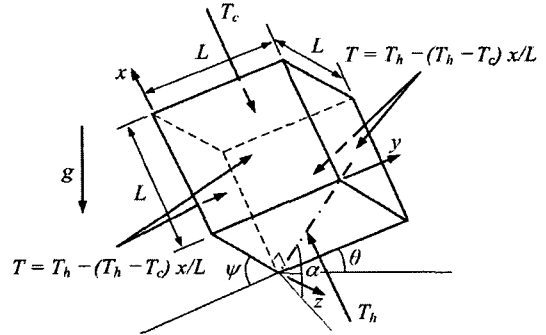


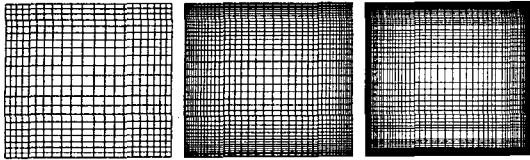
Fig. 1 Sketch defining the various orientations of the cubical cavity; $\alpha=45^\circ$ ($\psi=30^\circ$, $\theta=35.264^\circ$).

한편 Mamun et al.^(9,10)은 최근 3차원 자연대류 현상의 검증용 해로 보다 적합한 다양한 실험결과를 제시하기 위해 Leong et al.^(3,4)의 기존연구의 연장선상에서 새로운 실험 및 수치해석 결과를 제시하였다. 이것은 3차원 캐비티내의 자연대류 문제에 대한 새로운 검증용 해로 기존연구에 추가하여 평면에 대한 새로운 기울기(이하 다이아몬드(diamond)형 기울기라 함)를 제시하고 있다(Fig.1 참조).

본 연구에서는 기존의 수치해석적인 연구들^(5,6)의 연장선상에서 Leong et al.⁽³⁾ 및 Mamun et al.^(9,10)이 제시한 실험모델인 3차원 정육면체 캐비티내에서 발생하는 정상상태 자연대류현상에서 캐비티의 평면에 대한 다이아몬드형 기울기 변화 및 Ra(Rayleigh number)가 캐비티 내부에 형성되는 유동과 열전달현상에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 살펴본다. 이를 위해 본 연구에서는 비정렬 셀 중심 방법을 채용하고 있는 3차원 유동해석코드(PowerCFD)^(7,8)를 사용하여 실험조건과 같은 Ra가 10^4 , 4×10^4 , 10^5 인 경우일 때 3차원 캐비티가 평면에 대해 다양한 다이아몬드형 기울기를 가진 경우에 대해 수치해석하고, 저온 벽에썩의 평균 Nu(Nusselt number)를 예측하여 기존의 검증용 해인 실험결과값들과 비교 검증한다.

2. 수치해석

본 연구에서 대상으로 한 3차원 정육면체 캐비티의 형태와 경계조건은 Mamun et al.⁽⁹⁾의 실험조건과 같다. 즉, Fig.1에서와 같이 $x=0$ 인 평면



(a) 21×21×21 CV (b) 41×41×41 CV (c) 81×81×81 CV

Fig. 2 Grid distribution of domain for calculation.

은 고온($T_h=307$ K)이며, $x=L(=0.1272$ m)인 평면은 저온($T_c=300$ K)인 두 개의 서로 다른 온도를 가지는 등온 벽이 존재하고, 두 벽을 연결하는 그 이외의 다른 네 측면 벽은 낮은 온도의 벽에서 높은 온도의 벽으로 다음과 같은 선형 온도분포 $T=T_h-(T_h-T_c)x/L$ 를 가지는 등온 조건을 사용하고 있다.

본 연구에서는 먼저 수치해석의 타당성을 검증하기 위해 Leong et al.^(3,4)의 기존 연구결과와 Mamun et al.⁽⁹⁾에 의해 새롭게 제시된 실험결과를 본 연구의 수치해석결과와 비교 검증하였다. 여기서 새로운 기울기는 밀폐된 3차원 캐비티가 다이아몬드 형상으로 보이게 되는 공간상의 위치에 있을 때를 말하며, 이를 기하학적으로는 3차원 캐비티에서 대각선으로 마주보는 모서리 점들을 연결한 네 쌍의 선분(line element)들 중에 하나의 선분이 수평평면에 대해 수직으로 위치함을 말한다. 이로써 3차원 캐비티가 아래 수평면에 대해 각각 ψ 와 θ 의 각을 이루고, 다이아몬드 형상을 나타내는 3차원 캐비티에서 아랫면을 형성하는 네 개의 벽면 중 하나는 높은 온도를 가지는 벽이 된다.⁽¹⁰⁾ 이는 3차원 캐비티의 아래 수평면에서 지면과 만나는 모서리에 대각을 이루는 어느 한 모서리와 연결한 직선이 아래 수평면과

Table 1 Comparison between the numerical solution and the experimental results for Nusselt numbers on the cold wall; $\alpha=45^\circ$ ($\psi=30^\circ$, $\theta=35.264^\circ$)

Ra	Nu	
	Experiments (Mamun et al.)	Present prediction
1×10^4	1.676 ± 0.026	1.6240
4×10^4	2.763 ± 0.033	2.7822
1×10^5	3.856 ± 0.043	3.8944

의 기울기인 α 로 새롭게 정의될 수 있다. 일례로 Mamun et al.⁽⁹⁾이 실험한 조건인 $\psi=30^\circ$ 와 $\theta=35.264^\circ$ 의 각을 이룰 경우 $\alpha=45^\circ$ 가 된다.⁽¹⁰⁾

Fig. 2는 Ra가 4×10^4 일 때 Hortmann et al.⁽¹¹⁾이 언급한 제어체적의 수에 따른 수치계산의 비의존성을 검증하기 위해 본 연구에서 사용한 세 가지 격자계(21×21×21 CV, 41×41×41 CV 및 81×81×81 CV)로 비등간격 비정렬 사각형 격자계의 단면을 나타낸다.

본 연구에서 사용한 해석코드(PowerCFD)^(7,8)는 기존 연구^(5,6)와 마찬가지로 자체 개발한 코드로 비정렬 셀 중심 방법을 채택하여 열/유체 유동 문제를 해석할 수 있는 3차원 해석 알고리즘을 사용하고 있으며, 이미 2차원 및 3차원 열/유체 유동해석 성능이 입증되어 있다.

본 연구를 위해 사용된 지배방정식은 무차원화된 3차원 층류 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식으로, 이와 같은 식들을 풀기 위해 대류항 계산에는 상용 CFD 코드에서 널리 사용되고 있는 2차 중심차분법을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

먼저 본 연구를 위해 사용한 수치해석방법의 타당성을 확인하기 위하여 Table 1은 Mamun et al.⁽⁹⁾이 실험한 다이아몬드형 기울기인 α 가 45° 인 캐비티의 저온 벽면에서 각 Ra에 따라 본 수치계산을 통해 예측된 평균 Nu를 검증용 해인 실험결과와 비교하여 나타낸다. Table 1에 나타난 것과 같이 본 연구에서 각각의 Ra에 따라 저온 벽면에서 예측된 평균 Nu는 Ra가 1×10^4 일 때 가장 큰 오차범위인 3.1%를 나타내고, 그 외의

Table 2 Comparison between the numerical solution and the experimental results for Nusselt numbers on the cold wall; $Ra=4 \times 10^4$, $\psi=35.264^\circ$, $\theta=45^\circ$

Cell number	Nu		
	TASCflow3D (VFP) (Mamun et al.)	Present prediction (CFP)	Experiments (Mamun et al.)
21 CV	2.8981	2.7974	2.763 ± 0.033
41 CV	2.7622	2.7608	
81 CV	2.7562	2.7586	

경우는 Mamun et al.⁽⁹⁾이 실험에서 얻은 평균 Nu의 오차범위 안에 드는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 본 연구를 위해 활용한 비정렬 코드^(7,8)에 사용된 수치해석방법의 적합성을 재차 확인할 수 있었다.

Table 2에서는 본 연구를 위해 사용한 제어체적 수에 따른 수치계산의 비의존성을 확인하기 위해 Mamun et al.⁽⁹⁾이 수행한 수치해석결과와 실험결과를 함께 나타낸 것이다. 하지만, Mamun et al.⁽⁹⁾의 수치해석결과는 추가 수정논문⁽¹⁰⁾에서 이미 언급된 것과 같이 실제 실험에서 사용한 캐비티의 다이아몬드형 기울기조건과의 차이로 인해 실험결과값과 다소 차이가 존재한다(수치계산에 사용된 각도; $\psi=35.264^\circ$ 와 $\theta=45^\circ$). 따라서, 기울기 조건의 차이 때문에 Mamun et al.⁽⁹⁾의 수치해석결과는 실험결과와 직접적인 비교·검증의 대상이 될 수 없지만, 제어체적 수에 따른 수치계산의 비의존성을 확인하기 위한 참고대상의 역할은 충분히 한다고 할 수 있다. 결과적으로 제어체적 수에 따른 수치계산의 비의존성은 Table 2에 나타낸 것과 같이 본 연구를 위해 사용한 해석코드^(7,8)의 결과가 Mamun et al.⁽⁹⁾의 수치해석결과보다 더 높게 나타난다. 즉, 제어체적 수에 따른 본 수치계산의 의존성은 기존연구보다 낮고, 그 결과에 따라 $81 \times 81 \times 81$ CV의 비등간격 비정렬 사각형 격자를 사용하여 예측한 결과를 Table 1을 포함한 이하의 모든 수치해석결과로 제시한다.

한편, Mamun et al.⁽⁹⁾은 실험을 통해 $Ra=4 \times 10^4$ 일 때 기존의 Leong et al.^(3,4)의 실험과 수치해석결과에서 불안정한 유동특성을 나타내는 $Ra=10^5$ 일 때와 같이 평균 Nu가 실험오차라고 간주할 수 없는 2.76과 2.82의 서로 다른 근사적인 두 값으로 나타남을 확인하였다. 여기서 기존의 Leong et al.^(3,4)은 $Ra=10^5$ 일 경우 실험에 사용한 평균 온도 T_m 에 따라 두 가지 해법(평균 Nu)이 존재함을 확인하였다. 하지만, Mamun et al.⁽⁹⁾은 Leong et al.^(3,4)의 연장선상에 있는 자신들의 실험에서 기존의 실험에서 고려한 변수인 ΔT 와 T_m 의 그 어느 변수에도 수치해석결과가 의존하지 않음을 확인한 것과 같이, 본 연구에서도 PowerCFD 코드를 활용한 수치해석결과가 실험에서 고려한 그 어떠한 변수에도 의존하지 않고 오직 평균 Nu가 2.76에 근사적인 값으로 나타남을 확인할 수 있었

다. 그리고 Table 2에 나타낸 것과 같이 Mamun et al.⁽⁹⁾은 상용 CFD 코드인 TASCflow3D를 활용하여 수치계산 하였을 때 CFP(Constant Fluid Properties) 조건을 사용한 경우보다 VFP(Variable Fluid Properties) 조건을 사용한 경우가 두 가지 해법 중 하나인 $Nu=2.76$ 과 -0.25% 의 오차범위를 가지는 2.7562의 값을 나타냄을 확인하였다. 하지만, 본 연구에서는 CFP 조건만 사용하여 수치계산한 결과로 $Nu=2.76$ 인 해법과 -0.16% 의 오차범위를 가지는 2.7586의 값을 얻었다. 따라서 $Ra=4 \times 10^4$ 일 때 왜 실험에서는 두 가지 값이 존재하는가에 대해서는 좀더 확실한 원인규명이 필요하다.

Fig. 3은 3차원 캐비티의 기울기가 $\psi=30^\circ$ 와 $\theta=35.264^\circ$, 즉 $\alpha=45^\circ$ 인 경우, Ra가 증가함에 따른 캐비티 내부의 x축($y=0$ 과 $z=0$)과 대각에 위치한 모서리를 이은 평면(대칭면)상에 형성되는 등온선도와 속도장의 변화를 나타낸다. 왼쪽에 나타낸 등온선도 결과를 보면 Ra가 증가할수록 캐비티의 중심영역을 기점으로 반전되는 현상이 강해지고, 고온과 저온 벽면 근처에서의 온도구배

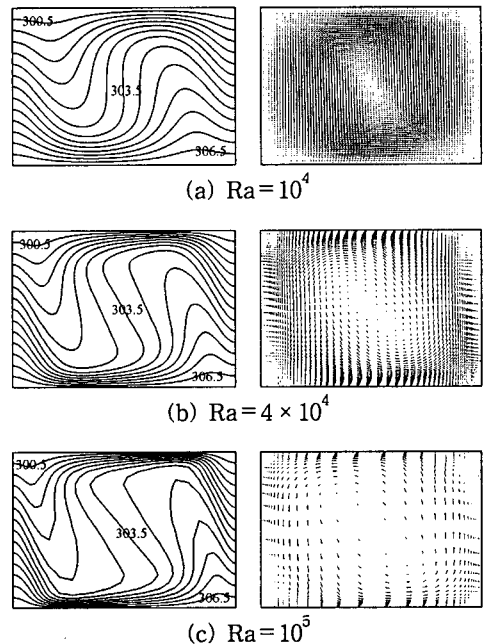


Fig. 3 Isotherms and vector plots for different Rayleigh numbers at $\alpha=45^\circ$ ($\psi=30^\circ$, $\theta=35.264^\circ$).

Table 3 Comparison between the numerical solution and the experimental results for the mean Nusselt numbers on the cold wall; $Ra = 4 \times 10^4$

θ	ψ	α	Nu	
			Experiments (Mamun et al.)	Present prediction
0°	0°	0°	2.018 ± 0.017	2.0004
35.264°	30°	45°	2.763 ± 0.033	2.7822

는 증가함을 확인할 수 있다. 또한 오른쪽에 나타낸 벡터선도로부터 Ra 가 증가할수록 캐비티 중심영역에서 발생하는 정지영역의 크기가 점점 증가함을 확인할 수 있다. 이와 같은 등온선도와 벡터선도의 형태는 이미 기존의 연구^(5,6)에서 제시한 것과 같이 3차원 캐비티의 기울기가 $\psi = 0^\circ$ 와 $\theta = 45^\circ$ 일 때 Ra 가 증가함에 따라 캐비티 내부에 형성되는 등온선도와 속도장의 변화와 닮은꼴임을 확인할 수 있다.

Table 3은 $Ra = 4 \times 10^4$ 일 경우 캐비티의 다이아몬드형 기울기에 따라 저온 벽면에서 예측된 평균 Nu를 검증용 해인 Mamun et al.^(9,10)의 실험결과와 비교하여 나타내었다. 본 연구에서 예측한 저온 벽면에서 평균 Nu는 검증용 해의 평균 Nu의 범위 안에 드는 것을 확인할 수 있으며, 이는 본 연구에서 사용된 수치해석방법이 모든 캐비티의 다이아몬드형 기울기에 대해서 타당함을 입증한다.

Table 4는 기존의 연구^(5,6)에서 제시한 것과 같이 $Ra = 4 \times 10^4$ 일 경우 캐비티 기울기 ψ 가 일정하고, θ 만 45° 와 90° 으로 변할 때 저온 벽면에서 예측된 평균 Nu를 검증용 해인 Leong et al.^(3,4)의 실험결과와 비교하여 나타낸다. 여기서, Table 3과 Table 4를 종합하여 보면, $Ra = 4 \times 10^4$ 일 때

Table 4 Comparison of the mean Nusselt numbers measured and predicted; $Ra = 4 \times 10^4$

θ	ψ	α	Nu	
			Experiments (Leong et al.)	Present prediction
45°	0°	31.4°	2.650 ± 0.027	2.547
90°	0°	59.9°	2.337 ± 0.020	2.324

3차원 캐비티내에서 자연대류 열전달은 부력구동 유동형태와 Rayleigh-Benard 자연대류 유동형태가 혼합적으로 나타나는 3차원 복합유동형태로 이루어지기 때문에, 각각의 부력구동 및 Rayleigh-Benard 자연대류 유동과 같은 2차원 단일유동형태를 가지는 다른 두 가지 경우($\psi = 0^\circ$ 이고, $\theta = 0^\circ$ 와 90°)와 비록 동일한 복합유동형태를 형성하지만 2차원의 형태를 가지는 경우($\psi = 0^\circ$ 이고, $\theta = 45^\circ$)보다 높게 발생함을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 Ra 에 따른 캐비티의 다이아몬드형 기울기와 평균 Nu의 상관관계를 3차 다항식선도와 함께 나타낸 것이다. 여기서 $Ra = 1 \times 10^5$ 이고, $\alpha = 0^\circ$ ($\psi = 0^\circ$ 와 $\theta = 0^\circ$)일 경우는 자연대류 열전달 현상이 불안정성을 가지기 때문에 캐비티의 다이아몬드형 기울기와 평균 Nu의 상관관계식을 구할 때 제외시켰다. 그림으로부터 자연대류가 발생하는 캐비티내에서 캐비티의 다이아몬드형 기울기는 자연대류 열전달현상을 증가(또는 감소)시킬 수 있음을 명확하게 확인할 수 있다. 그 대표적인 예로 $Ra = 4 \times 10^4$ 인 경우 그래프 상에 나타낸 추세선을 통해 확인할 수 있듯이 캐비티의 다이아몬드형 기울기가 0° 에서부터 증가함에 따라 열전달현상은 급격하게 증가하고, 캐비티가 $40^\circ \sim 42^\circ(41^\circ)$ 의 다이아몬드형 기울기를 가질 때 평균 Nu는 약 2.8169의 최대값을 가진 후, 캐비티의 다이아몬드형 기울기가 41° 를 초과하여 90° 로 증가함에 따라 평균 Nu는 상대적으로 완만하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, $Ra = 4 \times 10^4$ 일 때 밀폐된 3차원 캐비티내에서 발생하는 자연대류현

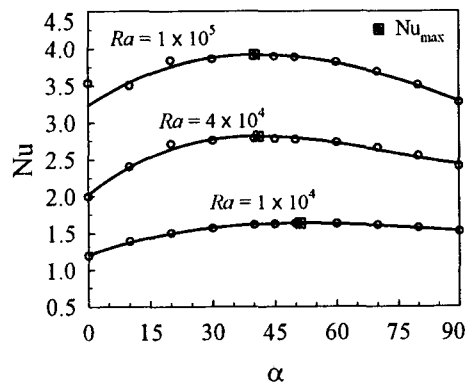


Fig. 4 Predicted mean Nusselt numbers for different angle and Rayleigh number.

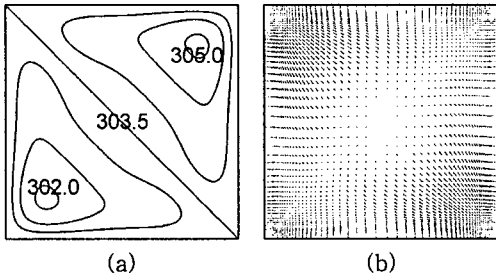


Fig. 5 (a) Isotherm and (b) vector plot at the middle plane ($x/L=0.5$) for $\alpha=45^\circ$ ($\psi=30^\circ$, $\theta=35.264^\circ$) and $Ra=4 \times 10^4$.

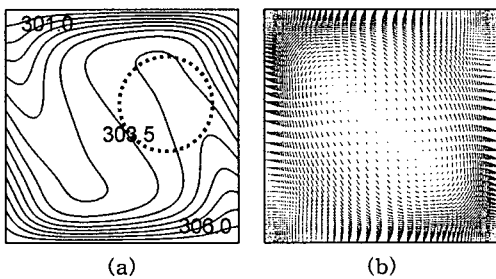


Fig. 6 (a) Isotherm and (b) vector plot at the middle plane (z/L and $y/L=0.5$) for $\alpha=45^\circ$ ($\psi=30^\circ$, $\theta=35.264^\circ$) and $Ra=4 \times 10^4$.

상에 의한 열전달은 캐비티의 다이아몬드형 기울기가 $40^\circ \sim 42^\circ (41^\circ)$ 일 때 최대값을 가짐을 알 수 있다. 그리고 Ra 가 증가함에 따라 최대값의 평균 Nu 를 가지는 캐비티의 다이아몬드형 기울기는 그 차이를 눈으로 직접 확인하기엔 다소 어려움이 있지만 예측된 추세선도의 최대값을 계산한 후 수치적 확인을 통해 점점 작아지는 경향을 확인할 수 있었다. 이와 같은 사실은 $Ra \leq 10^5$ 에서 Ra 가 증가하면서 열전달현상은 상대적으로 부력구동 유동형태보다는 Rayleigh-Benard 자연대류 유동형태에 의해 강하게 지배되어짐을 나타낸다.

Fig.5와 Fig.6은 각각의 축의 중심(x , y 및 $z=L/2$) 평면에서의 등온선도와 벡터선도를 나타낸다. Fig.5는 본 연구에서 사용된 3차원 캐비티가 $y-z$ 평면상의 대각선을 한 변으로 하는 x 축에 평행한 평면에 대해 대칭적인 유동형태를 가짐을 확인할 수 있다. 즉, Fig.5(a)에 나타난 등온선도에서 303.5 K 등온선을 기준으로 캐비티내의 유동은 상하로 반전됨을 확인할 수 있다. 그리고

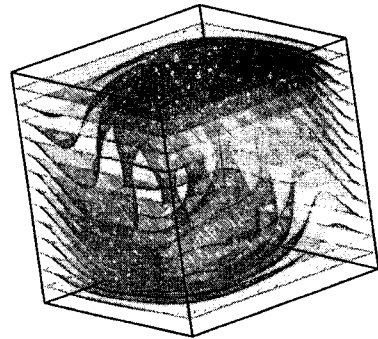


Fig. 7 3D-Isotherm plot for $\alpha=45^\circ$ ($\psi=30^\circ$, $\theta=35.264^\circ$) and $Ra=4 \times 10^4$.

Fig.6에 나타난 것과 같이 y 축 혹은 z 축을 따라 $L/2$ 지점에서 $x-y$ 및 $z-x$ 평면상의 등온선도와 벡터선도는 서로 같은 형태를 나타내고, 부력구동 유동형태와 Rayleigh-Benard 자연대류 유동형태 등 두 가지의 유동형태가 혼합적으로 나타나는 복합유동형태를 나타낸다(Fig.6의 점선 원참고).

마지막으로 Fig.7은 $Ra=4 \times 10^4$ 이고, $\alpha=45^\circ$ ($\psi=30^\circ$, $\theta=35.264^\circ$)일 때의 예측된 등온평면도로, Fig.3에서 나타난 캐비티 내부의 x 축($y=0$ 과 $z=0$)과 대각에 위치한 모서리를 이은 평면을 기준으로 전체적인 유동형태가 좌우대칭을 이루고 있음을 확인할 수 있고, 또한 Fig.5에서 언급한 $y-z$ 평면상의 대각선을 한 변으로 하는 x 축에 평행한 평면에 대해 대칭적인 유동형태를 나타냄을 입체적으로 확인할 수 있다. 이와 같이 밀폐된 3차원 캐비티내에서 실제 발생하는 대칭적인 형태를 가지는 3차원 자연대류 열전달현상의 특성과 앞에서 언급한 유동형태들을 입체적으로 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 비정렬 셀 중심 방법을 채용하고 있는 3차원 유동해석코드(PowerCFD 코드)를 사용하여 3차원 정육면체 캐비티내의 자연대류 열전달 문제를 대상으로 유체유동과 열전달 과정에서 지배적 인자인 Rayleigh 수(Ra), 3차원 캐비티의 다이아몬드형 기울기인 α (또는 ψ , θ) 등과 같은 매개변수들에 대한 영향을 수치해석적인 방법을 통하여 살펴보았다. 연구결과,

(1) $10^4 \leq Ra \leq 10^5$ 에서 $\alpha = 45^\circ$ ($\psi = 30^\circ$, $\theta = 35.264^\circ$) 일 때 3차원 캐비티내에서 자연대류 열전달은 부력구동 유동형태와 Rayleigh-Benard 자연대류 유동형태가 혼합적으로 나타나는 3차원 복합유동형태로 이루어지기 때문에 각각의 부력구동 및 Rayleigh-Benard 자연대류 유동과 같은 2차원 단일 유동형태를 가지는 다른 두 가지 경우 ($\psi = 0^\circ$ 이고, $\theta = 0^\circ$ 와 90°)와 비록 동일한 복합유동형태를 형성하지만 2차원의 형태를 가지는 경우 ($\psi = 0^\circ$ 이고, $\theta = 45^\circ$)보다 높게 발생한다(단, 이와 같은 결과는 자연대류 열전달현상이 불안정성을 가지는 $Ra = 10^5$ 일 때 $\theta = 0^\circ$ 일 경우는 예외.)

(2) 자연대류가 존재하는 정육면체의 밀폐공간에서 캐비티의 다이아몬드형 기울기는 자연대류 열전달현상을 증가(또는 감소)시킬 수 있음이 확인되었고, 대표적인 경우로 $Ra = 4 \times 10^4$ 일 때 자연대류현상에 의한 열전달은 캐비티의 다이아몬드형 기울기가 $40^\circ \sim 42^\circ$ (41°)일 때 최대값을 가짐을 확인하였다.

(3) 자연대류가 존재하는 정육면체의 밀폐공간에서 열전달현상이 가장 활발하게 나타나는 캐비티의 다이아몬드형 기울기는 Ra 가 증가함에 따라 작아짐을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Fusegi, T., Hyun, J. M., Kuwahara, K. and Farouk, B., 1991, A numerical study of three-dimensional natural convection in a differentially heated cubical enclosure, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 6, pp. 1543-1557.
2. Pallares, J., Cuesta, I., Grau, F. X. and Francesc Giralt, 1996, Natural convection in a cubical cavity heated from below at low Rayleigh numbers, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 15, pp. 3233-3247.
3. Leong, W. H., Hollands, K. G. T. and Brunger, A. P., 1998, Experimental Nusselt numbers for a cubical-cavity benchmark problem in natural convection, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1979-1989.
4. Leong, W. H., Hollands, K. G. T. and Brunger, A. P., 1998, On a physically-realizable benchmark problem in internal natural convection, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 3817-3828.
5. Myong, H. K., 2006, Numerical study on the characteristics of natural convection flows in a cubical cavity, *Trans. KSME Part B*, Vol. 30, pp. 337-342.
6. Myong, H. K. and Kim, J. E., 2005, Numerical study on the nature of natural convection in a cubical cavity, *Proc. of KSME Fall Meeting, Part B*, pp. 176-181.
7. Myong, H. K. and Kim, J., 2005, Development of 3-d flow analysis code using unstructured grid system (I) - numerical method, *Trans. KSME Part B*, Vol. 29, pp. 1049-1056.
8. Myong, H. K., Kim, J. and Kim, J. E., 2005, Development of 3-d flow analysis code using unstructured grid system (II) - code's performance evaluation, *Trans. KSME Part B*, Vol. 29, pp. 1057-1064.
9. Mamun, M. A. M., Leong, W. H., Hollands, K. G. T. and Johnson, D. A., 2003, Cubicalcavity natural-convection benchmark experiments: an extension, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3655-3660.
10. Mamun, M. A. M., Leong, W. H., Hollands, K. G. T. and Johnson, D. A., 2005, Erratum to: cubical-cavity natural-convection benchmark experiments: an Extension [*Int. J. of Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 3655-3660], *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, p. 1224.
11. Hortmann, M., Peric, M. and Scheuerer, G., 1990, Finite volume multigrid prediction of laminar natural convection: benchmark solution, *Int. J. for Num. Meth. in Fluids*, Vol. 11, pp. 189-207.