

# 다이아몬드형태의 3차원 캐비티내 자연대류 유동에 관한 수치적 연구 : $Ra = 1 \times 10^5$

김 종 은<sup>1</sup>, 명 현 국<sup>2\*</sup>

## NUMERICAL STUDY ON NATURAL CONVECTION IN A CUBICAL-CAVITY WITH A DIAMOND-TYPE ORIENTATION : $Ra = 1 \times 10^5$

J.E. Kim and H.K. Myong

*Natural convection flows in a cubical air-filled 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. An extension to a previously published work, special attention of this work is paid to three-dimensional flow and thermal characteristics in nature convection according to new orientation at  $Ra= 1 \times 10^5$ . Comparisons of the average Nusselt number at the cold face are made with benchmark solutions and experimental results found in the literature. It is demonstrated that the average Nusselt number on the cold face has a maximum value around the diamond-type inclination angle of  $43.2^\circ$  at  $Ra= 1 \times 10^5$ . We also report the effect of new orientation on the type of flow and temperature structure in a cubical-cavity.*

**Key Words:** 수치적 연구(Numerical Study), 자연대류(Natural Convection), 3차원 정육면체 캐비티(Cubical Cavity), 비정렬 셀 중심 방법(Unstructured Cell-Centered Method), Ra(Rayleigh Number), 다이아몬드형태(Diamond-Type)

### 1. 서 론

유체내에서 온도 혹은 농도구배에 의해 발생하는 밀도차에 의한 자연대류 유동현상은 태양에너지 집열기, 전자 및 기계 부품의 냉각과 열에너지 저장시스템 등과 같은 다양한 공학 시스템내에서 흔히 볼 수 있는 자연현상으로 공학적인 관점에서 매우 중요한 메커니즘이다. 따라서 단순한 기하학적 형상을 가지는 3차원 정육면체 캐비티내의 자연대류 유동에 대한 연구는 수치적인 방법과 실험적인 방법으로 구분되어 다양하게 행하여져왔다. 대표적인 수치해석방법을 통한 선행연구들로서 Fusegi et al.[1]은 온도가 다른 두 수직 벽을 가지는 3차원 캐비티내에서 발생하는 부력구동(buoyancy-driven) 자연대류의 유동형태와 특성에 관하여 언급하였고, Pallares et

al.[2,3]은 온도가 다른 두 수평면을 가지는 3차원 캐비티내에서 발생하는 Rayleigh- Benard 자연대류의 유동형태와 특성을 기존의 연구결과들과 비교 검토하였다. 그런데 이 모든 연구들에선 온도가 서로 다른 두 벽면을 제외한 나머지 벽면들은 단열조건이나, 실제실험에서 수치적 연구를 위해 제시된 조건과 같이 완벽하게 벽면을 단열시키는 것은 불가능하다.[1-3] 따라서 Leong et al.[4, 5]은 밀폐된 3차원 캐비티내에서 발생하는 자연대류현상을 이해하기 위해 물리적으로 타당한 즉, 실험적인 방법으로 실현이 가능한 검증용 해(benchmark solution)로 두개의 서로 다른 온도를 가지는 등은 벽과 그 외 나머지 네 측면의 벽이 고온의 벽에서 저온의 벽으로 선형온도분포(LTP; Linear Temperature Profile)를 가지는 등온조건을 경계조건으로 하여, 공기로 가득 찬 3차원 캐비티내의 자연대류 유동현상을 실험과 함께 수치해석결과를 제시하였다. 특히, 이들은 캐비티의 기울기를  $\theta = 0^\circ, 45^\circ$  및  $90^\circ$ 인 세 가지 경우로 구분하여, Rayleigh-Benard 자연대류현상( $\theta = 0^\circ$ 인 경우)과 부력구동 자연대류현상( $\theta = 90^\circ$ 인 경우)을 포함하여, 이

1 학생회원, 국민대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

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

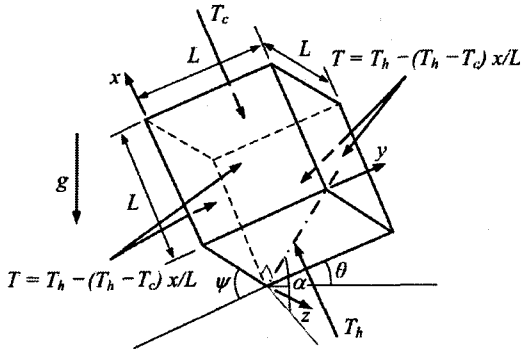


Fig. 1 Sketch defining the various orientations of the cubical cavity;  $\alpha = 45^\circ$  ( $\psi = 30^\circ$ ,  $\theta = 35.264^\circ$ )

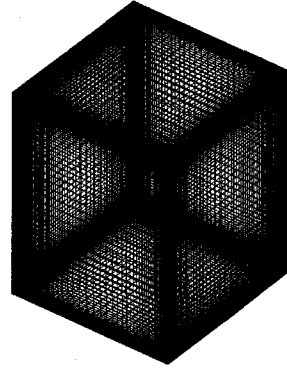


Fig. 2 Grid distribution.

두 현상이 혼합된 경우( $\theta = 45^\circ$ 인 경우)에 대한 열전달특성을 연구하였다.

한편 Mamun et al.[6, 7]은 최근 3차원 자연대류현상의 검증 용해로 보다 다양한 실험결과를 제시하기 위해, Leong et al.[4, 5]이 제시한 검증용 문제의 연장선상에서 Fig. 1에 나타난 바와 같이 평면에 대한 기울기(이하 다이아몬드(diamond)형 기울기라 함)를 새롭게 정의하고, 실험과 함께 수치해석결과를 제시하였다. 최근, Myong et al.[8-10]은 Leong et al.[4, 5]과 Mamun et al.[6, 7]이 실험한 3차원 정육면체 캐비티내 자연대류 열전달 문제를 비정렬 셀 중심 방법(cell-centered method)을 채택하고 있는 자체 개발한 3차원 유동해석코드(PowerCFD)[11, 12]를 사용하여 수치해석하고, 제시된 검증용 해와의 비교·분석을 통해 코드의 적합성을 확인하였다. 이들은 다양한 캐비티의 기울기가 자연대류 열전달현상을 증가(또는 감소)시킬 수 있다는 사실과 함께 자연대류 열전달현상이 가장 높게 나타나는 특성 기울기를 제시하였다. 그리고 Rayleigh 수  $R=4 \times 10^4$ 일 때의 열전달특성을 확인하고 분석하였다.

본 연구는 기존의 수치해석적인 연구[8-10]의 연장선으로 Mamun et al.[6, 7]이 제시한 실험모델인 3차원 캐비티내에서 발생하는 정상상태 자연대류현상 중  $Ra = 1 \times 10^5$ 일 때 평면에 대한 캐비티의 다이아몬드형 기울기 변화가 캐비티 내부에 형성되는 유동과 열전달현상에 미치는 영향과 함께 열전달현상을 유동형태의 구조적인 측면에서 규명한다.

## 2. 수치해석

본 연구에서 대상으로 한 3차원 캐비티의 형태 및 경계조건은 Mamun et al.[6]의 실험조건과 같다. 즉, Fig. 1에서와 같이 서로 온도가 다른 고온( $T_h=307$  K)의  $x=0$ 인 평면과 저온

( $T_c=300$  K)의  $x=L(=0.1272$  m)인 평면은 평행하게 마주보는 두 개의 등온벽으로 존재하고, 두 벽을 연결하는 다른 네 측벽은 저온의 벽에서 고온의 벽으로 선형온도분포  $T = T_h - (T_h - T_c)x/L$ 를 가지는 등온조건이다. 여기서 새로운 기울기는 다음과 같이 정의한다. 즉 밀폐된 3차원 캐비티가 다이아몬드 형상으로 나타나는 공간상의 위치에 있을 때를 말하며, 이는 기하학적으로 3차원 캐비티에서 대각선으로 마주보는 모서리 점들을 연결한 네 쌍의 선분들(line elements) 중 하나의 선분이 수평평면에 대해 수직으로 위치하는 경우를 말한다. 이로써 3차원 캐비티가 아래 수평면에 대해 각각  $\psi$ 와  $\theta$ 의 각도를 이루고[6], 다이아몬드 형상을 나타내는 3차원 캐비티에서 아랫면을 형성하는 네 개의 벽면 중 하나는 높은 온도를 가지는 벽이 된다. 이는 3차원 캐비티의 아래 수평면에서 지면과 만나는 모서리에 대각을 이루는 어느 한 모서리와 연결한 직선이 아래 수평면과 이루는 기울기  $\alpha$ 로 다시 정의될 수 있다. 일례로서  $\psi=30^\circ$ 와  $\theta=35.264^\circ$ 인 경우,  $\alpha=45^\circ$ 가 된다[10].

본 연구를 위해 사용한 수치해석의 타당성과 제어체적수에 따른 수치계산결과와의 비의존성은 이미 기존연구[8-9]에서 Leong et al.[4, 5]의 연구결과뿐만 아니라 Mamun et al.[6]에 의해 새롭게 제시된 실험결과와의 비교·검증을 통하여 확인하였다. 따라서 Fig. 2에 나타난 것과 같이  $Ra=1 \times 10^5$ 일 때 본 연구에서는  $81 \times 81 \times 81$  CVs의 비등간격 비정렬 육면체 격자를 사용하여 예측한 결과를 Table 1을 포함한 이하의 모든 수치해석결과로 제시한다.

본 연구를 위해 사용된 지배방정식은 무차원화 된 3차원 층류 N-S 방정식과 에너지 방정식으로, 이 식들은 이전 연구 [8-10]에서와 같이 자체 개발한 해석코드(PowerCFD) [11, 12]를 사용하여 계산하였다. 이 해석코드[11, 12]는 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. 또한 본 연구에서는 대류항 계산에는 계산의 정확도를 높이기 위해 2차 중심차분법을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Table 1은  $Ra=1 \times 10^5$ 일 때 새로운 기울기  $\alpha$ 의 변화에 따라 저온벽면에서 예측된 평균 Nusselt 수  $Nu$ 를 검증용 해[5]와 비교하여 나타낸 것이다. 본 연구를 통해 예측된 저온벽면에서의 평균  $Nu$ 는  $\alpha$ 가  $0^\circ$ 와  $45^\circ$ 일 때 Leong et al.[4,5]과 Mamun et al.[6]의 실험 최대오차 범위내에 있다. 이는 본 연구를 위해 사용한 수치해석방법들이  $Ra=1 \times 10^5$ 일 경우 모든 캐비티 기울기에 대해 타당함을 의미하고 있다.

Fig. 3은  $Ra=1 \times 10^5$ 일 때  $\alpha$ 의 변화에 따라 저온벽면에서 예측된 평균  $Nu$ 에 대한 상관관계를 연결선도와 함께 나타낸 것이다. 특히  $\alpha$ 의 변화와 저온벽면상의 평균  $Nu$ 에 대한 상관관계를 보다 정확하게 확인하고 이해하기 위해, 지면상의 이유로 Table 1에 표기하지 않은 보다 상세한 각도에 따라 예측된 평균  $Nu$ 를 함께 나타냈다. 여기서  $\alpha$ 에

따라 예측된 평균  $Nu$ 의 변화는 밀폐된 3차원 캐비티에서  $\alpha$ 에 따른 자연대류 열전달현상의 변화를 명확하게 확인시켜준다. 즉, Fig. 3에 나타낸 것과 같이  $\alpha$ 가  $0^\circ$ 에서  $5^\circ$ 로 증가할 때 저온벽면의 평균  $Nu$ 는 급격하게 감소하다가  $5^\circ$ 를 기준으로

Table. 1 Comparison of the numerical simulation with the experimental results for Nusselt numbers on the cold wall ;  $Ra = 1 \times 10^5$ .

$\alpha$	Nu ( $Ra = 1 \times 10^5$ )	
	Experiments	Present Prediction
$0^\circ$	$3.509 \pm 0.035$	3.5364
$10^\circ$		3.5039
$20^\circ$		3.8409
$30^\circ$		3.8608
$40^\circ$		3.8922
$45^\circ$	$3.856 \pm 0.043$	3.8944
$50^\circ$		3.8831
$60^\circ$		3.8158
$70^\circ$		3.6880
$80^\circ$		3.5047
$90^\circ$		3.2738

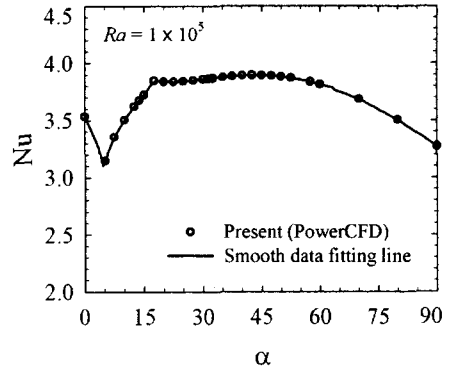


Fig. 3 Predicted mean Nusselt numbers for different diamond-type inclination angle at  $Ra = 1 \times 10^5$

로 급변하여  $\alpha$ 가  $5^\circ$ 에서  $20^\circ$ 로 증가함에 따라 저온벽면상의 평균  $Nu$ 는 다시 급격하게 증가하다가,  $\alpha$ 가  $20^\circ$ 인 지점에서 급변하는 변곡점을 가짐을 확인할 수 있다. 그리고  $20^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$ 일 때는 평균  $Nu$ 의 차이를 거의 확인할 수 없을 정도로 일정한 형태로 나타나고, Fig. 3에 나타낸 데이터 적합선을 활용하여 최대평균  $Nu = 3.8947$ 이  $\alpha$ 가  $40^\circ \sim 45^\circ (43.2^\circ)$ 일 때 나타남을 확인할 수 있다. 또한 평균  $Nu$ 는  $\alpha$ 가  $50^\circ$ 를 초과하여  $90^\circ$ 로 증가하면서 다시 완만하게 감소함을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 밀폐된 3차원 캐비티내에서  $Ra=1 \times 10^5$ 일 때 다이아몬드형 기울기인  $\alpha$ 에 따라 자연대류 열전달현상이 증가(또는 감소)될 수 있음을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 즉,  $\alpha$ 가  $5^\circ$ 와  $20^\circ$  근방에서 다이아몬드형 기울기에 따른 저온벽면에서의 평균  $Nu$ 가 급변하는 변곡점을 나타내며, 또한 자연대류 열전달현상은  $\alpha$ 가  $40^\circ \sim 45^\circ (43.2^\circ)$ 일 때 가장 활발하게 일어남을 확인할 수 있다.

Figs. 4와 5는  $Ra=1 \times 10^5$ 일 때 본 연구의 관심영역인  $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ 에서  $\alpha$ 의 증가에 따라 형성되는 유동형태를 나타내기 위해 온도가 303.5 K로 일정한 등온평면을 활용하여 주요  $\alpha$ 에 따라 나타낸 것을 원점을 기준으로 (-)방향과 (+)방향에서 바라본 입체도를 각각 나타낸다(수직축이  $x$ 축에 해당함). 본 연구에서는 이미 Fig. 3의 결과를 통해  $\alpha$ 가  $5^\circ$ 와  $20^\circ$ 일 때 저온벽면에서의 평균  $Nu$ 가 급변하는 변곡점을 가지는 특이현상을 확인하였다. 이와 같은 현상을 이해하기 위해 본 연구에서는 Pallares et al.[2,3]이 밀폐된 3차원 캐비티내에서 수직방향으로 온도구배가 존재하는 Rayleigh-Benard 자연대류현상( $\alpha = 0^\circ$ 인 경우)의 열전달특성을  $Ra$ 와 Prandtl 수  $Pr$ 의 변화에 따라 고온 벽면상의 국소  $Nu$  분포와  $x/L = 0.5$ 인 중앙평면에서의 수직속도선도의 2차원적 구조적인 형태를 통하여 설명한 것과 마찬가지로 개념을 기본적으로 응용한다. 그러나 본 연구에서는  $\alpha$ 변화에 따라 나타나는 3차원 유동의 형태를 입체적으

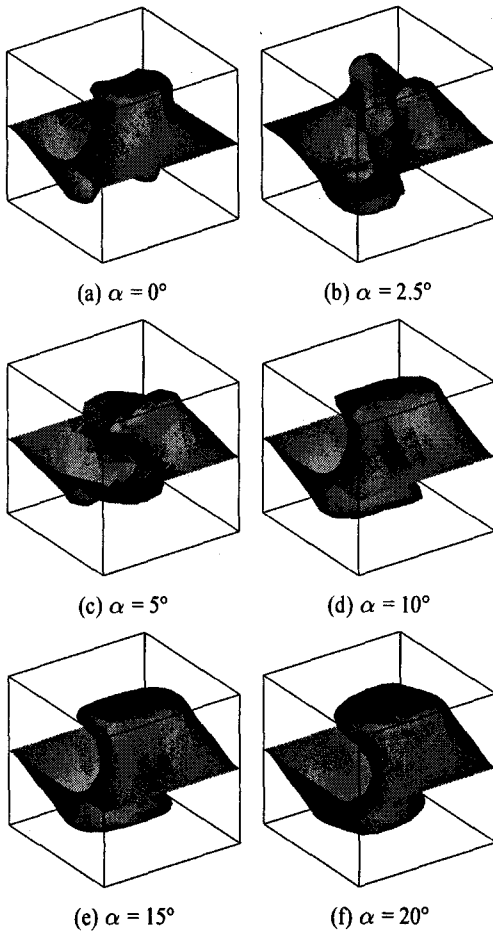


Fig. 4 Predicted isothermal-surface(303.5 K) for some small acute angles( $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ ) at  $Ra = 1 \times 10^5$

로 확인하고 이해하기 위해 2차원의 단면도를 통해 설명한 Pallares et al.[2,3]과는 달리 3차원적으로 나타난 특정온도 303.5 K의 등온평면이 형성하는 구조적인 형태를 통해 확인한다. 먼저, Fig. 3을 통해 확인할 수 있었던 특이한 두 변곡점은 Fig. 4에 나타난 것과 같이  $\alpha$ 가 5°와 20°인 특이점을 기준으로 내부유동형태를 구분하여 설명할 수 있다. 먼저, 첫 번째 급격하게 하강하는 영역인  $0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 에서 수직방향으로만 온도구배가 존재하는  $\alpha$ 가 0°인 Rayleigh-Bernard 자연대류인 경우 Figs. 4(a)와 5(a)에 나타난 것과 같이  $y/L=0.5$ 인 평면을 기준으로 좌우 서로 대칭적인 형태를 가진다. 그리고 그 형태는  $x$ 축 방향을 따라 상승하는 하나의 봉우리와 하강하는 두 개의 봉우리를 가지는 원셀(one cell) 유동형태임을 확인할 수 있다. 그러나  $\alpha$ 가 2.5°일 때는 Figs. 4(b)와 5(b)에 나타난 것과 같이  $z/L=0.5$ 인 평면을 기준으로 좌우 서로 대칭적인

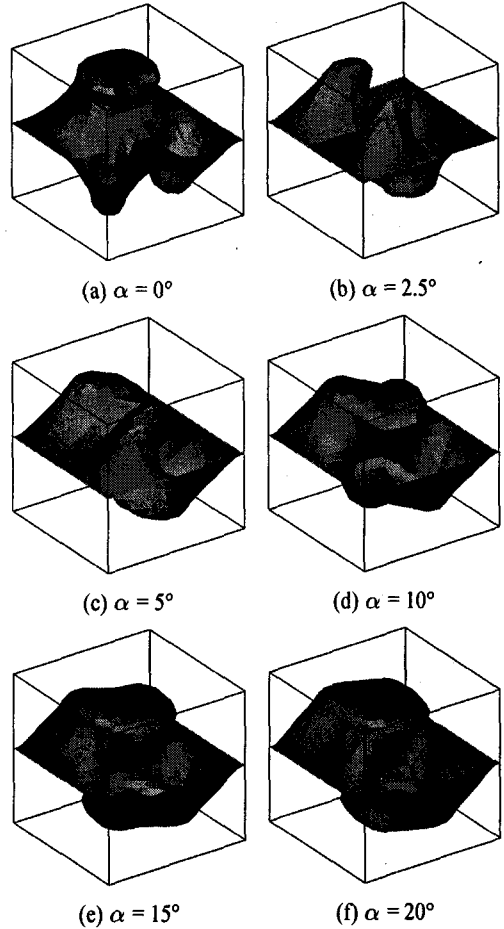


Fig. 5 Predicted isothermal-surface(303.5 K) for some small acute angles( $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ ) at  $Ra = 1 \times 10^5$ .

형태를 가진다. 이는 0°일 때의 유동형태가 상하로 역전된 후  $x$ 축을 기준으로 하여 반시계방향으로 90°회전한 형태이다. 이 유동형태는  $\alpha$ 가 5°로 되면서 상승하는 두 개의 봉우리가 캐비티의 바닥면에서 수평면을 기준으로 가장 멀어지는 모서리를 기준으로 하나의 봉우리로 합해지는 진행과정을 나타낸다. 하지만 Figs. 4(c)와 5(c)에 나타난 것과 같이 303.5 K인 등온평면의 형태는 등온조건인 상하벽면에서 다소 떨어진 중심부에서 복잡한 형태의 원셀 구조를 가지고 있다. 이와 같이  $0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 에서  $\alpha$ 의 변화에 따른 캐비티내 유동형태의 변화는 저온벽면 근처에서의 유동형태를 기준으로 0°에서는 강력한 하나의 봉우리를 통한 활발한 열전달현상이 일어나나, 2.5°가 되었을 때는 하나의 봉우리가 두 개의 봉우리로 분리되어 0°에서 보다 열전달현상이 확실하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 3을 통해서 확인할 수 있었던  $0^\circ \leq$

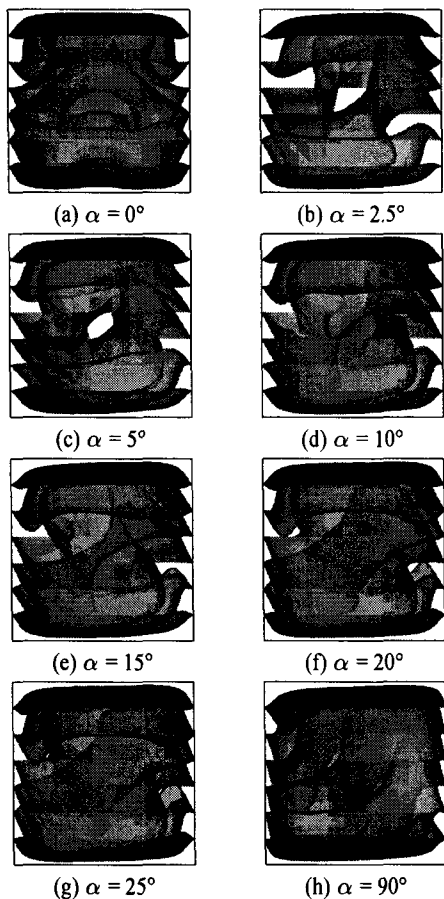


Fig. 6 Predicted isothermal-surface for primary angles at  $Ra = 1 \times 10^5$ .

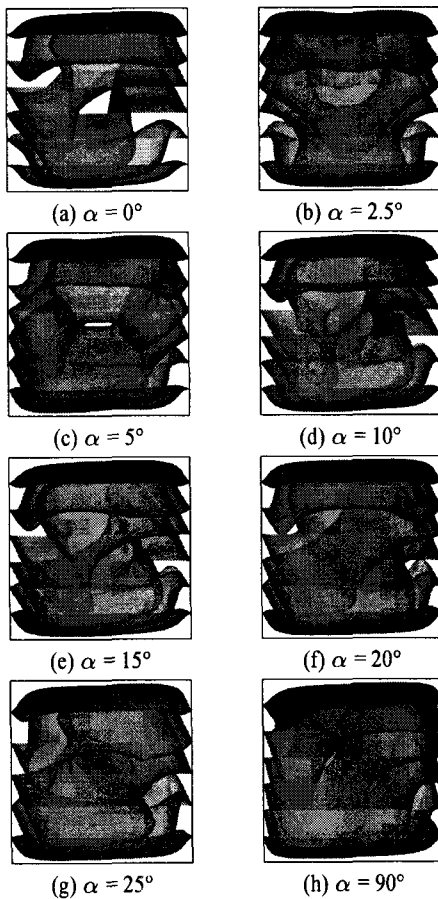


Fig. 7 Predicted isothermal-surface for primary angles at  $Ra = 1 \times 10^5$ .

$\alpha \leq 5^\circ$ 에서 최소평균 Nu를 나타내는  $5^\circ$ 에서의 유동형태는 두 개로 분리된 봉우리가 하나로 합해지면서 보다 강력한 하나의 봉우리로 나타나는 것이 아니라, 오히려 중심부에서 불안정한 형태로 형성되는 하나의 봉우리로 나타남을 확인하였다. 따라서 Fig. 3을 통해 확인할 수 있었던  $0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 에서  $\alpha$ 가 증가함에 따라 저온벽면에서의 평균 Nu가 급격하게 감소하는 현상은 앞에서 언급한 것과 같은 유동형태의 변화를 통하여 확인할 수 있다.

Figs. 6과 7은  $Ra=1 \times 10^5$ 일 때  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 범위에서  $\alpha$ 에 따라 형성되는 등온평면을 -y 방향과 -z 방향에서 바라본 것이다. 여기서 등온평면은 아랫면을 기준으로 306 K부터 1 K씩 감소하는 등온평면을 나타낸다. 먼저 가장 눈에 띄는 것은 이미 Fig. 3에서 언급한  $\alpha=20^\circ$ 일 때 나타나는 급격한 기울기를 가지는 변곡점을 기준으로 구분되는 유동형태의 특징이다. 즉  $\alpha$ 가  $5^\circ < \alpha \leq 20^\circ$ 일 때는 Figs. 4(b)와 5(b)에 나타난 것과 같은

상승하는 두 개의 봉우리가 이미  $5^\circ$ 에서 불안정한 혼합의 형태를 가지는 하나의 봉우리로 진행되면서, Figs. 6(d),(e),(f)와 7(d),(e),(f)에 나타난 것과 같이  $\alpha$ 가 증가하면서 다이아몬드형태를 가지는 캐비티형상에 의해 상대적으로 지면과 떨어진 위치에 나타나는 하나의 상승 봉우리가 점점 더 강력한 형태로 진행되어 감을 뚜렷이 확인할 수 있다. 그리고 지면상의 이유로 다 제시하지 않았지만 Fig. 3에서 언급한 거의 차이가 없는 평균Nu가 나타난  $20^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$ 일 때는 유동형태에서도 거의 변화가 없음을 확인할 수 있었다. 그리고  $\alpha$ 가  $50^\circ$ 를 초과하여  $90^\circ$ 로 증가하면서 평균 Nu가 다시 완만하게 감소하는 부분에서의 유동형태는 Figs. 6(g)(h)와 7(g)(h)에 나타난 것과 같이 캐비티 중심부에서 다소 약화된 유동의 형태를 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 밀폐된 3차원 캐비티내에서  $Ra=1 \times 10^5$ 일 때 다이아몬드형 기울기인  $\alpha$ 에 따라 자연대류 열전달현상이 내부에 발생하는 유동형태에 따라 어느 특징기



점을 기준으로 증가(또는 감소)될 수 있음을 명확하게 확인할 수 있다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 비정렬 셀 중심 방법을 채용하고 있는 3차원 유동해석코드(PowerCFD 코드)를 사용하여  $Ra=1 \times 10^5$  일 때 3차원 정육면체 캐비티내의 자연대류 열전달문제를 대상으로 유체유동과 열전달 과정에서 지배적 인자인 3차원 캐비티의 다이아몬드형 기울기인  $\alpha$ (또는  $\psi, \theta$ )에 대한 영향을 수치해석적 방법을 통하여 살펴보았다. 연구결과,

(1) 자연대류가 존재하는 정육면체의 밀폐공간에서  $Ra=1 \times 10^5$  일 때 다이아몬드형 기울기는 특정기점을 기준으로 자연대류 열전달현상을 증가(또는 감소)시킬 수 있음이 확인되었다. 또한 이러한 현상은 다이아몬드형 기울기의 변화에 따라 캐비티 내부에 형성되는 유동형태의 변화로 설명할 수 있었다.

(2) 자연대류가 존재하는 정육면체의 밀폐공간에서  $Ra=1 \times 10^5$  일 때 다이아몬드형 기울기변화에 따른 열전달값은  $\alpha$ 가  $40^\circ \sim 45^\circ(43.2^\circ)$ 로 되었을 때 가장 크게 나타남이 확인되었다.

### 참고문헌

[1] Fusegi, T. et al., 1991, "A Numerical Study of Three-Dimensional Natural Convection in a Differentially Heated Cubical Enclosure," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.34, p. 1543-1557.

[2] Pallares, J. er al., 1996, "Natural Convection in a Cubical Cavity Heated from Below at Low Rayleigh Numbers," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.39, p. 3233-3247.

[3] Pallares, J. et al., 1999, "Flow Transitions in Laminar Rayleigh- Benard Convection in a Cubical Cavity at

Moderate Rayleigh Numbers," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.42, p. 753-769.

[4] Leong, W.H. et al., 1998, "Experimental Nusselt Numbers for a Cubical-Cavity Benchmark Problem in Natural Convection," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.42, p. 1979-1989.

[5] Leong, W.H. et al., 1998, "On a Physically-Realizable Benchmark Problem in Internal Natural Convection," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.41, p. 3817-3828.

[6] Mamun, M.A.M. et al., 2003, "Cubical-Cavity Natural-Convection Benchmark Experiments: an Extension," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.46, p. 3655-3660.

[7] Mamun, M.A.M. et al, 2005, "Erratum to: "Cubical- Cavity Natural-Convection Benchmark Experiments: an Extension" [International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 3655-3660]," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.48, p. 1224.

[8] Myong, H.K., 2006, "Numerical Study on the Characteristics of Natural Convection Flows in a Cubical Cavity," *Trans. of the KSME(B)*, Vol.30, p. 337-342.

[9] Myong, H.K. et al., 2005, "Numerical Study on the Nature of Natural Convection in a Cubical-Cavity," *Proc. of the KSME(B) Fall annual Meeting*, p. 176-181.

[10] Myong, H.K., and Kim, J. E., 2006, "Numerical Study on Slanted Cubical-Cavity Natural Convection," *Trans. SAREK*. Vol.18, No.9, p. 722-728.

[11] Myong, H.K. and Kim, J. T., 2005, "Development of 3D Flow Analysis Code using Unstructured Grid System(1st Report, Numerical Method)," *Trans. of the KSME(B)*, Vol.29, p. 1049-1056.

[12] Myong, H.K. et al., 2005, "Development of 3D Flow Analysis Code using Unstructured Grid System(2nd Report, Code's Performance Evaluation)," *Trans. of the KSME(B)*, Vol.29, p. 1057-1064.