

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.6.435

이중으로 경사진 3차원 캐비티내 자연대류 열전달 특성에 관한 수치해석적 연구

명 현 국[†]

(2009년 1월 8일 접수, 2009년 4월 20일 수정, 2009년 4월 27일 심사완료)

Numerical Investigation on Heat Transfer Characteristics for Natural Convection Flows in a Doubly-Inclined Cubical-Cavity

Hyon Kook Myong

Key Words: Natural Convection(자연대류), Cubical Cavity(3차원 정육면체 캐비티), Heat Transfer(열전달), Numerical Investigation(수치해석적 연구), Rayleigh Number(Ra 수), Doubly-Inclined(이중으로 경사진), Unstructured Cell-Centered Method(비정렬 셀 중심 방법)

Abstract

Three-dimensional heat transfer characteristics for natural convection flows are numerically investigated in the doubly-inclined cubical-cavity according to the variation of a newly defined orientation angle α of the hot wall surface from horizontal plane at moderate Rayleigh numbers. Numerical simulations of laminar flows are conducted in the range of Rayleigh numbers($10^4 \leq Ra \leq 10^5$) and $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ with a solution code(PowerCFD) employing unstructured cell-centered method. Comparisons of the average Nusselt number at the cold face are made with benchmark solutions and experimental results found in the literature. It is found that the average Nusselt number at the cold wall has a maximum value around the specified orientation α at each Rayleigh number. Special attention is also paid to three-dimensional thermal characteristics in natural convection according to new orientation angles at $Ra = 1 \times 10^5$, in order to investigate a new additional heat transfer characteristic found in the range of above $Ra = 6 \times 10^4$.

1. 서론

온도나 농도구배에 따른 유체의 밀도차 때문에 발생하는 자연대류 유동현상은 태양에너지 집열기, 전자 및 기계부품의 냉각, 열에너지 저장시스템 등과 같은 다양한 공학시스템내의 열/물질의 전달과정에서 흔히 접할 수 있는 중요한 자연현

상으로 공학적인 관점에서 매우 활용도가 높은 메커니즘이다. 따라서 단순한 기하학적 형상을 갖는 3차원 정육면체 캐비티내의 자연대류 유동에 대한 다양한 수치해석적 및 실험적 연구가 수행되어져왔다.⁽¹⁻⁶⁾ 수치해석방법으로 행해진 대표적인 선행연구로는 Fusegi et al.⁽¹⁾의 온도가 서로 다른 두 수직 벽을 가지는 3차원 캐비티내에서 발생하는 부력구동(buoyancy-driven) 자연대류에 관한 연구와, Pallares et al.^(2,3)의 온도가 서로 다른 두 수평면을 가지는 3차원 캐비티 내에서 발생하는 Rayleigh-Benard 자연대류에 대한 기존의

[†] 회원, 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail : myong@kookmin.ac.kr
TEL : (02)910-4714 FAX : (02)910-4839

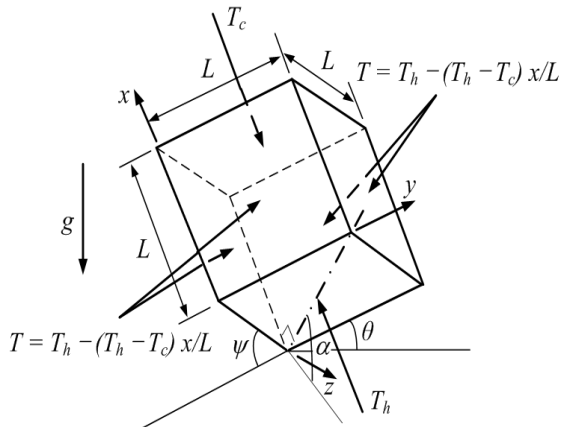


Fig. 1 Sketch defining the various orientations of the cubical cavity

연구결과들과 비교·검토한 연구를 들 수 있다. 그러나 이들 연구들에서는 온도가 서로 다른 두 벽면을 제외한 나머지 벽면들에 대해 실험적으로 수행하기 불가능한 단열조건이 적용되었다.⁽¹⁻³⁾ 따라서 Leong et al.^(4,5)은 밀폐된 3차원 캐비티내에서 발생하는 자연대류 현상을 이해하기 위해 물리적으로 타당한 즉, 실험적인 방법으로 실현이 가능한 검증용 해(benchmark solution)를 수치계산 결과와 함께 제시하였다. 이들은 경계조건으로 두개의 서로 다른 온도를 가지는 등온 벽과 두 벽을 연결하는 그 외 나머지 네 측면의 벽이 고온 벽에서 저온 벽으로 선형온도분포(LTP; Linear Temperature Profile)를 가지는 조건을 사용하였다. 특히, 이들은 Fig. 1에서 $\psi = 0^\circ$ 인 단순한 형태의 3차원 캐비티 유동에 대해 3가지 경우를 연구하였다. 즉, 전형적인 Rayleigh-Benard 자연대류 현상($\theta = 0^\circ$ 인 경우)과 부력구동 자연대류 현상($\theta = 90^\circ$ 인 경우), 그리고 이 두 현상이 혼합된 경우($\theta = 45^\circ$ 인 경우)이다. 연구결과 예상과 달리 두 현상이 혼합된 캐비티 기울기 $\theta = 45^\circ$ (및 $\psi = 0^\circ$)인 경우의 평균 Nu 수(Nusselt number)가 다른 두 경우보다 더 높게 나타난다고 보고하였다. 참고로 Leong et al.⁽⁵⁾이 제시한 이 검증용 해는 2001년 개최된 ICHMT 2nd Int. Symp. on Advances in Computational Heat Transfer에서 검증용 해로 선택되어 많은 연구자들에 의해 논의 및 검증되었다.⁽⁶⁾

명 등^(7,8)은 Leong et al.^(4,5)이 실험한 $\psi = 0^\circ$ 인 단순한 형태의 3차원 정육면체 캐비티내 자연대류 열전달 문제를 수치해석하고, 기울기 θ 의 변

화에 따른 열전달 특성을 파악하였다. 연구결과 캐비티의 기울기가 자연대류 열전달현상을 증가(또는 감소)시킬 수 있다는 사실과 함께 자연대류 열전달현상이 가장 높게 나타나는 특성 기울기가 존재함을 제시하였다. 이들은 수치해석을 위해 비정렬 셀 중심 방법(cell-centered method)을 채택하고 있는 3차원 유동해석코드(PowerCFD)⁽⁹⁻¹¹⁾를 사용하였으며, 제시된 검증용 해와의 비교·분석을 통해 유동해석코드 및 수치해석방법의 적합성도 확인하였다.

한편 Mamun et al.^(12,13)은 최근 3차원 자연대류 현상의 검증용 해로 Leong et al.^(4,5)이 제시한 검증용 문제의 연장선상에서 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 Rayleigh-Benard 및 부력구동 자연대류 현상이 혼합되도록 수평면에 대해 이중으로 경사진(doubly-inclined) 다이아몬드(diamond)형에 대한 실험과 수치해석결과를 제시하였다. 그러나 이들은 한 가지 특수한 기울기($\psi = 30^\circ$, $\theta = 35.264^\circ$)에 대해서만 Ra 수(Rayleigh number)에 따른 평균 Nu 수의 영향을 연구하였다. 따라서 명과 김⁽¹⁴⁾은 이중으로 경사진 3차원 정육면체 캐비티내 자연대류 열전달 문제를 대상으로 Ra 수 및 새로운 다이아몬드형 기울기 α 에 따른 평균 Nu 수의 영향을 수치해석적으로 연구하였다. 연구결과 수치해석방법의 적합성 확인과 함께 다이아몬드형 기울기 변화도 자연대류 열전달현상을 증가(또는 감소)시킬 수 있다는 사실을 확인하고, 3개의 특정 Ra 수에 대해서 자연대류 열전달현상이 가장 높게 나타나는 특성 기울기 값을 제시하였다. 그러나 캐비티 내부에 형성되는 열전달 현상에 캐비티의 기울기 변화 및 Ra 수 변화가 미치는 영향을 구조적인 측면에서 규명하지는 못하였다. 또한 Ra 수가 어느 값 이상에서 기울기 변화에 따라 특이한 현상을 나타내는 새로운 사실을 제시하지 못하였다.

본 연구는 기존의 수치해석적인 연구^(7,8,14)의 연장선으로 이중으로 경사진 3차원 캐비티내 자연대류 열전달 문제에 대해 다이아몬드형 기울기 및 Ra 수 변화가 캐비티 내부에 형성되는 열전달 현상에 미치는 영향을 온도장에 대한 구조적인 측면에서 상세히 살펴본다. 지면관계상 별도의 논문⁽¹⁵⁾에서는 다이아몬드형 기울기 α 를 새롭게 정의하고, $Ra = 4 \times 10^4$ 인 경우에 대해서만 이 기울기 변화가 캐비티 내부에 형성되는 열전달현상

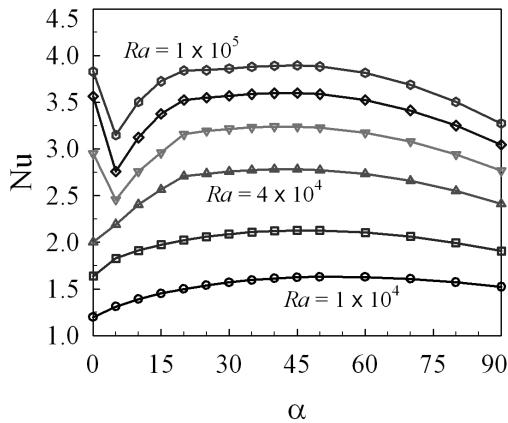


Fig. 2 Predicted mean Nusselt numbers for different doubly-inclined diamond-type angles

에 미치는 영향을 온도장에 대한 구조적인 측면에서 살펴보았다. 또한 이중으로 경사진 캐비티인 경우가 단순한 형태의 캐비티($\psi = 0^\circ$ 인 경우) 경우보다 모든 기울기에 걸쳐 저온 벽상의 평균 Nu 수가 높게 나타나는 것을 확인하여, 열전달 관점에서 이중으로 경사진 다이아몬드형 캐비티 경우가 단순한 형태로 경사진 캐비티인 경우보다 모든 기울기에 대해 더 우수함을 입증하였다. 따라서 본 논문에서는 먼저 $10^4 \leq Ra \leq 10^5$ 및 $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 범위에서 Ra 수 및 다이아몬드형 기울기 변화가 캐비티 내부에 형성되는 유동형태 및 열전달 특성에 대해 수치해석을 통해 살펴본다. 특히 본 연구를 통해 새롭게 얻어지는 사실인 특정 값 이상의 Ra 수에서 $0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 의 구간에서 나타나는 특이한 현상을 규명하기 위해 $Ra = 1 \times 10^5$ 인 경우에 대해 구조적인 측면에서 상세히 고찰한다.

2. 수치해석

본 연구에서 대상으로 한 3차원 캐비티의 형태 및 경계조건은 Mamun et al.⁽⁶⁾의 실험조건과 같다. 즉, Fig. 1에서와 같이 온도가 다른 고온($T_h = 307$ K)의 평면($x = 0$)과 저온($T_c = 300$ K)의 평면($x = L = 0.1272$ m)은 등온 벽으로 서로 평행하게 마주보고 있으며, 두 벽을 연결하는 다른 네 측벽은 저온 벽에서 고온 벽으로 선형온도분포 $T = T_h - (T_h - T_c)x/L$ 를 가지는 조건이다. 본 논문에서는 이중으로 경사진 다이아몬드형 기울기 α 를 Fig. 1에서 보는 바와 같이 고온 벽의

Table 1 Comparison of the numerical simulation with the experimental results for Nusselt numbers on the cold wall at $Ra = 4 \times 10^4$ and $Ra = 1 \times 10^5$

α	$Nu(Ra = 4 \times 10^4)$	
	Experiments ^(5,12)	Present prediction
0°	2.018 ± 0.017	2.000
45°	2.763 ± 0.033	2.782

α	$Nu(Ra = 1 \times 10^5)$	
	Experiments ^(5,12)	Present prediction
0°	3.509 ± 0.035	3.536
45°	3.856 ± 0.043	3.894

어느 한 모퉁이를 수평 평면에 유지한 채 기울어졌을 때 이 고온 벽 전체가 수평 평면과 동일하게 이루는 각도로 단순하게 정의하였다. 이와 같이 새롭게 정의한 기울기는 이중으로 경사진 좌우 동형인 다이아몬드형 캐비티 형태를 유지하면서 기울기 변화에 따라 Rayleigh-Benard 자연대류에서 부력구동 자연대류로 자연스럽게 바꾸게 할 수 있으며, Mamun et al.^(12,13)이 제시한 특수한 각도($\psi = 30^\circ$ 와 $\theta = 35.264^\circ$)에서의 다이아몬드형 캐비티 형태를 하나의 기울기 변수 $\alpha = 45^\circ$ 로 용이하게 나타낼 수 있다.⁽¹⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 이하 새로운 기울기 α 에 따른 열전달 특성에 관해 고찰한다. 참고로 3차원 캐비티의 공간적 구조는 일반적으로는 두 개의 각도를 사용하여 표현되나, 본 연구에서와 같이 고온면 전체가 수평면과 동일한 각도를 이루는 경우는 특수한 경우로 이 각도 하나만으로 나타낼 수 있다.

본 연구를 위해 사용된 지배방정식은 무차원화된 3차원 층류 Navier-Stokes 방정식과 에너지 방정식으로, 이 식들은 자체 개발한 해석코드⁽⁹⁻¹¹⁾를 사용하였으며, 대류항 계산에는 계산의 정확도를 높이기 위해 2차 중심차분법을 사용하였다. 참고로 본 연구를 위해 사용한 해석코드의 적합성과 수치해석의 타당성 및 검사체적 개수에 따른 수치계산의 비의존성은 이미 기존연구^(7,8,14,15)에서 Leong et al.^(4,5)의 연구결과뿐만 아니라 Mamun et al.⁽¹²⁾에 의해 새롭게 제시된 실험결과와의 비교·검증을 통하여 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 모든 경우에 대해 약 53만($81 \times 81 \times 81$) 개의 검

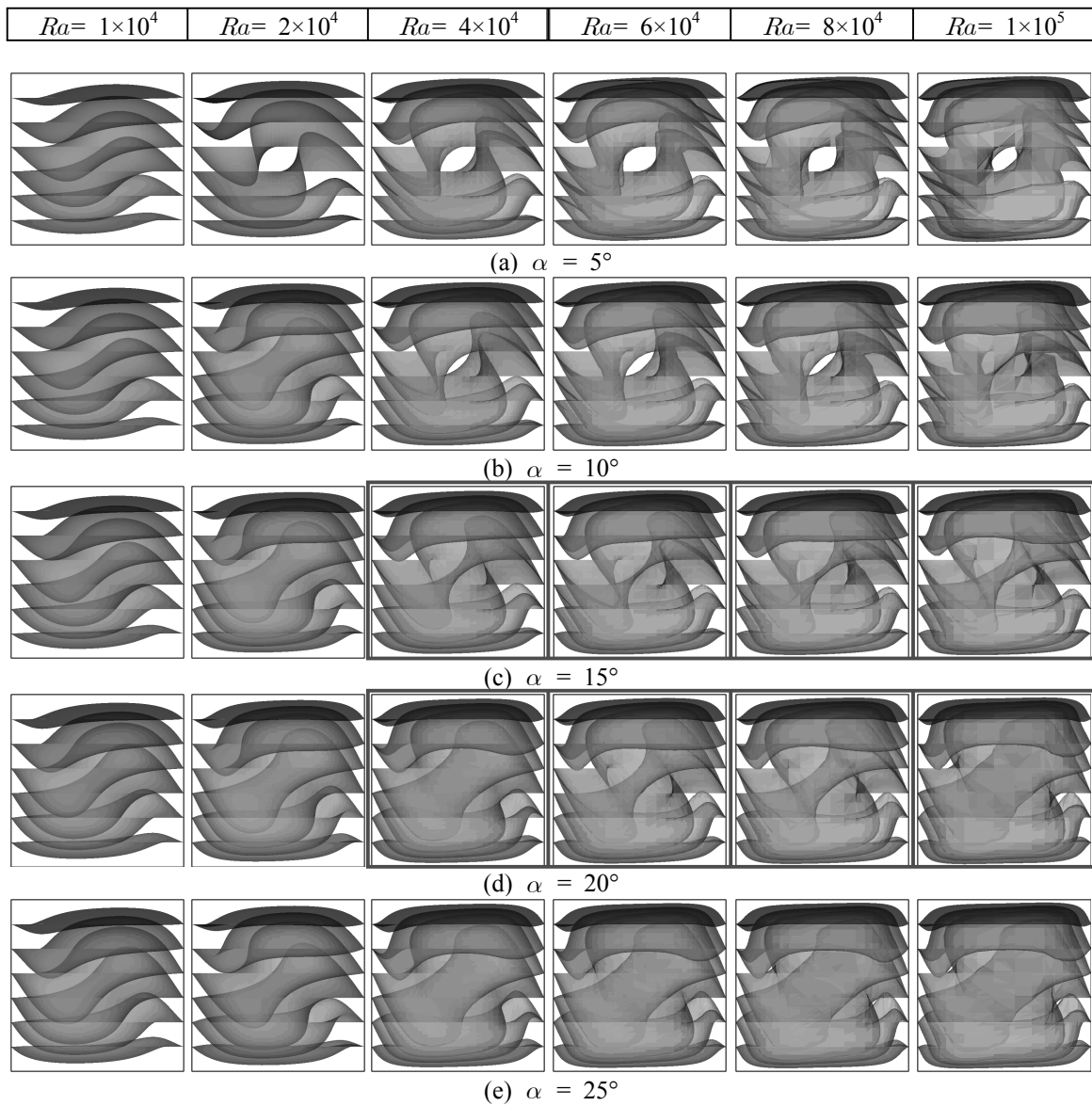


Fig. 3 Predicted isothermal-surface for primary angles in the range of $1 \times 10^4 \leq Ra \leq 10^5$ (view point: negative y direction).

사체적을 가지는 비등간격 비정렬 육면체 격자를 사용하여 예측한 결과를 Table 1을 포함한 이하의 모든 수치해석결과로 제시한다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 $10^4 \leq Ra \leq 10^5$ 구간에서 새롭게 정의된 기울기 α 의 변화에 따라 저온 벽에서 예측된 평균 Nu 수에 대한 수치해석 결과를 나타낸 것이다. 참고로 본 연구를 통해 예측된 저온 벽에서의 평균 Nu 수는 Table 1에 제시한 바와 같이

$Ra = 4 \times 10^4$ 및 $Ra = 1 \times 10^5$ 에서 α 가 0° 와 45° 일 때에 대해 모두 검증용 해로 제시된 Leong et al.^(4,5)과 Mamun et al.⁽¹²⁾의 실험 최대오차 범위 내에 있어, 수치해석 결과의 신뢰성을 반증해 주고 있다. 예측결과를 보면 상대적으로 낮은 Ra 수인 $Ra = 10^4$ 과 $Ra = 2 \times 10^4$ 일 때는 기울기 α 의 변화에 따라 평균 Nu 수는 완만한 곡선의 형태로 증가하다가 감소하며, 최소값은 $\alpha = 0^\circ$ 에서 나타난다. 그러나 $Ra = 4 \times 10^4$ 이상일 때는 평균 Nu 수가 $5^\circ < \alpha < 20^\circ$ 범위에서는 상대적으로 급격하게 증가하다가, $20^\circ < \alpha < 50^\circ$ 범위에서는 거의 일정한 값으

로 나타난 후, 50° 이상의 기울기에서는 평균 Nu 수가 다시 완만하게 감소하고 있다. 또한 $Ra > 6 \times 10^4$ 에서는 작은 기울기 $0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 범위에서 기울기 α 의 증가에 따라 저온 벽의 평균 Nu 수가 급격하게 감소하다가, $\alpha = 5^\circ$ 를 기점으로 급상승하는 특이점이 나타나는데, 이것은 본 연구를 통해 처음 확인된 사실이다. 즉 Ra 수가 4×10^4 이상일 때의 $\alpha = 20^\circ$ 인 지점과 Ra 수가 6×10^4 이상일 때의 $\alpha = 5^\circ$ 인 지점에서 변곡점이 나타나고 있다. 이러한 결과는 각각의 Ra 수에서 기울기 α 의 변화는 평균 Nu 수에 다양하게 영향을 미치고 있으며, 본 연구에서 관심을 가지는 이중으로 경사진 다이아몬드 형태의 밀폐된 3차원 캐비티내에서 나타나는 α 에 따른 자연대류 열전달현상의 변화를 수치적인 변화를 통하여 확인시켜 주고 있다. 결과를 좀 더 세밀하게 분석해 보면 Ra 수가 4×10^4 보다 작은 영역에서는 Ra 수가 증가할수록 평균 Nu 수가 최대값을 가지는 기울기 α 는 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 다이아몬드 형상의 밀폐된 3차원 캐비티내에서 $Ra < 4 \times 10^4$ 인 경우 자연대류에 의한 열전달은 Ra 수가 작을수록 부력구동 자연대류 현상이 Rayleigh-Benard 자연대류 현상에 비해 지배적으로 나타나기 때문으로 사료된다. 반면 Ra 수가 4×10^4 보다 큰 영역에서는 Ra 수에 따른 기울기 α 와 평균 Nu 수의 관계가 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 전체 기울기에 걸쳐 유사한 형태로 나타나고, 또한 저온 벽의 최대 평균 Nu 수도 $40^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 사이에서 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Ra 수가 4×10^4 보다 크고 기울기의 범위가 $40^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 일 때 부력구동 자연대류 유동형태와 Rayleigh-Benard 자연대류 유동형태가 아주 이상적인 형태로 혼합되어 최대 자연대류 열전달이 발생함을 의미한다. 이와 함께 Fig. 2의 결과를 종합하여 살펴보면 기울기가 $20^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$ 인 영역을 제외한 $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ 와 $50^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 인 영역에서 기울기 α 에 따른 평균 Nu 수의 변화(기울기)가 Ra 수의 증가와 함께 커지는 것을 확인할 수 있다.

이상 기술한 바와 같이 Fig. 2의 결과를 통해 즉 Ra 수가 4×10^4 이상일 때의 $\alpha = 20^\circ$ 인 지점과 Ra 수가 6×10^4 이상일 때의 $\alpha = 5^\circ$ 인 지점에서 저온 벽에서의 평균 Nu 수가 급변하는 변곡점을 가지는 특이현상을 확인하였다. 본 연구에서는 이와 같은 현상을 이해하기 위해 Pallares et al.^(2,3)가

사용한 개념과 유사한 개념을 적용한다. 참고로 이들은 밀폐된 3차원 캐비티내에서 수직방향으로 온도구배가 존재하는 Rayleigh-Benard 자연대류 현상($\alpha = 0^\circ$ 인 경우)의 열전달 특성을 Ra 수와 Prandtl 수의 변화에 따라 고온 벽면에서의 국소 Nu 수 분포와 $x/L = 0.5$ 인 중앙평면에서의 수직 속도선도의 2차원 구조적인 형태를 통하여 설명하였다. 본 연구에서는 기울기 α 변화에 따라 나타나는 3차원 유동의 형태를 입체적으로 확인하고 이해하기 위해, 특정 단면에서의 분포를 통해 2차원적으로 설명한 Pallares et al.^(2,3)과는 달리 몇 가지 특정온도들의 등온평면이 3차원적으로 형성하는 구조적인 형태를 통해 확인한다.

Fig. 3에는 각각의 Ra 수에서 $5^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$ 범위에서 기울기 α 에 따라 형성되는 등온평면도를 $-y$ 방향에서 바라본 것을 나타냈다. 여기서 등온평면은 아랫면을 기준으로 306 K부터 1 K씩 감소하는 등온평면을 나타낸다. 먼저 가장 눈에 띄는 것은 이미 Fig. 2에 언급한 Ra 수가 4×10^4 이상일 때 $\alpha \approx 20^\circ$ 인 지점을 기준으로 구분되는 유동형태의 특징이다. 즉 Ra 수가 4×10^4 이상인 경우에는 α 가 20° 보다 작을 때 두 개의 봉우리를 가지는 원셀(one cell) 구조의 유동형태를 나타내나, 기울기 α 가 0° 에서 20° 로 증가할수록 다이아몬드형태를 가지는 캐비티 형상에 의해 상대적으로 지면에 근접한 위치에 나타나는 봉우리 하나가 점점 그 크기가 약해져서 결국에는 20° 부근에서 강력한 하나의 봉우리를 가지는 원셀 구조로 전환되어 나타난다. 이는 지면상의 이유로 생략하였지만 α 가 90° 가 될 때까지 그 형태를 유지하고 있음을 입체적인 3차원의 형태로부터 확인할 수 있었다. 이러한 유동형태의 변화가 결과적으로 캐비티내의 열전달 현상에 크게 영향을 미치고 있는 것으로, 요약하면 Ra 수가 4×10^4 이상일 때는 기울기 α 가 5° 에 20° 까지 증가할 때 유동의 형태가 두 개의 봉우리에서 점점 더 강력한 하나의 봉우리로 발달하면서, 보다 강력하게 자연대류에 의한 열전달이 이루어지는 것이다. 즉 두 개로 양분된 열전달 통로가 보다 강력한 하나의 열전달 통로로 발전하는 것을 의미한다. 반면 Ra 수가 1×10^4 과 2×10^4 인 경우, Fig. 2에서 보는 바와 같이 기울기 α 에 따라 저온 벽에서의 평균 Nu 수가 완만하게 증가하였다가 다시 감소하는 것은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 $\alpha = 0^\circ$ 부

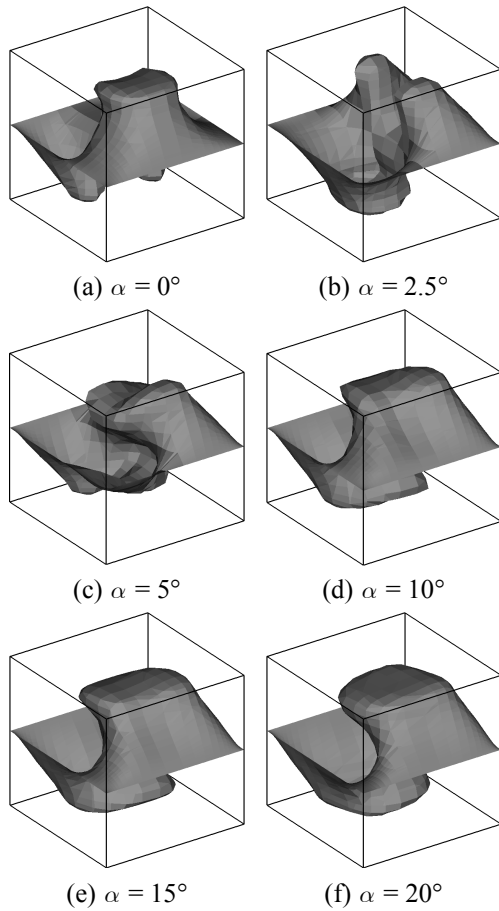


Fig. 4 Predicted isothermal-surface(303.5 K) for several small acute angles($0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$) at $Ra = 1 \times 10^5$.

터 90° 까지 캐비티 중심에 나타나는 회전축을 기점으로 상승·하강하는 하나의 봉우리를 가지는 원셀 구조의 유동형태가 특별한 변화 없이 유지되어 나타나기 때문이다.

다음으로 본 연구를 통해 새롭게 확인된 사실인 $Ra > 6 \times 10^4$ 에서 작은 기울기 $0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 범위에서 기울기 α 의 증가에 따라 저온 벽의 평균 Nu 수가 급격하게 감소하다가, $\alpha = 5^\circ$ 를 기점으로 급상승하는 특이점이 나타나는 현상을 $Ra = 1 \times 10^5$ 인 경우의 결과를 통해 온도장에 대한 구조적인 측면에서 규명한다.

Figs. 4와 5는 $Ra = 1 \times 10^5$ 일 때 본 연구의 관심 영역인 $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ 에서 α 의 증가에 따라 형성되는 유동형태를 나타내기 위해 온도가 303.5 K로 일정한 등온평면을 활용하여 주요 α 에 따라 나타난 것을 원점을 기준으로 (-)방향과 (+)방향에서 바라본 입체도를 각각 나타낸다(수직축이 x 축

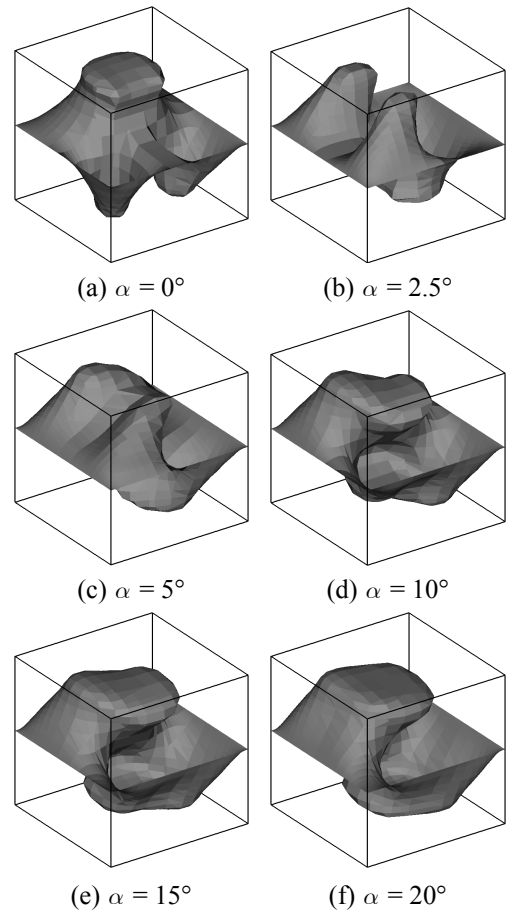


Fig. 5 Predicted isothermal-surface(303.5 K) for several small acute angles($0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$) at $Ra = 1 \times 10^5$ (view point: opposite direction of Fig. 4).

에 해당함). 먼저, Fig. 2를 통해 확인할 수 있었던 특이한 두 변곡점은 Figs. 4와 5에 나타난 것과 같이 α 가 5° 와 20° 인 특이점을 기준으로 내부 유동형태를 구분하여 설명할 수 있다. 먼저, 첫 번째 급격하게 하강하는 영역인 $0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 에서 수직방향으로만 온도구배가 존재하는 α 가 0° 인 Rayleigh-Benard 자연대류인 경우 Figs. 4(a)와 5(a)에 나타낸 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 유동형태임을 확인할 수 있다. 그러나 α 가 2.5° 일 때는 Figs. 4(b)와 5(b)에 나타낸 것과 같이 $z/L = 0.5$ 인 평면을 기준으로 좌우 서로 대칭적인 형태를 가진다. 이는 0° 일 때의 유동형태가 상하로 역전된 후 x 축을 기준으로 하여 반시계방향으로 90° 회전한 형태이다. 이 유동형태는 α 가 5° 로 되

면서 상승하는 두 개의 봉우리가 캐비티의 바닥 면에서 수평면을 기준으로 가장 멀어지는 모서리를 기준으로 하나의 봉우리로 합해지는 진행과정을 나타낸다. 하지만 Figs. 4(c)와 5(c)에 나타낸 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 α 의 변화에 따른 캐비티내 유동형태의 변화는 저온 벽 근처에서의 유동형태를 기준으로 0° 에서는 강력한 하나의 봉우리를 통한 활발한 열전달 현상이 일어나나, 2.5° 가 되었을 때는 하나의 봉우리가 두 개의 봉우리로 분리되어 0° 에서 보다 열전달 현상이 확실하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 $0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 에서 최소평균 Nu 수를 나타내는 5° 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. 2를 통해 확인할 수 있었던 $0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 에서 α 가 증가함에 따라 저온 벽에서의 평균 Nu 수가 급격하게 감소하는 현상은 앞에서 언급한 것과 같은 유동형태의 변화를 통하여 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 비정렬 셀 중심 방법을 채용하고 있는 3차원 유동해석방법(PowerCFD 코드)를 사용하여 이중으로 경사진 다이아몬드형태의 밀폐된 3차원 정육면체 캐비티내의 자연대류 열전달 문제를 대상으로 캐비티의 기울기인 α 와 Ra 수가 캐비티 내부에 형성되는 유동형태 및 열전달현상에 미치는 영향들을 수치해석을 통해 온도장에 대한 구조적인 측면에서 살펴보았다. 특히 본 연구를 통해 새롭게 얻어지는 사실인 특정 값 이상의 Ra 수에서 $0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 의 기울기 범위에서 나타나는 특이한 현상을 규명하기 위해 $Ra = 1 \times 10^5$ 인 경우에 대해 구조적인 측면에서 상세히 고찰하였다. 연구결과,

(1) $Ra \leq 2 \times 10^4$ 일 때 기울기 α 의 변화에 따른 평균 Nu 수는 완만한 곡선을 따라 증가하다가 감소하고, 유동의 형태는 강한 하나의 봉우리를 가지는 대각평면 대칭의 원셀 구조이다.

(2) $Ra \geq 4 \times 10^4$ 일 때 기울기 α 에 따라 형성되는 캐비티 내부의 유동형태는 처음에는 약한 두 개의 봉우리를 가지는 평행축선 대칭의 원셀 구조에서 $\alpha \approx 20^\circ$ 를 기점으로 강한 하나의 봉우리를 가지는 대각평면 대칭의 원셀 구조로 전환됨을 확인하였다.

(3) Ra 수가 6×10^4 보다 큰 영역에서 기울기 α 가 5° 와 20° 부근에서 저온 벽에서의 평균 Nu 수가 급변하는 변곡점을 가지는 특이현상을 확인하였다. 또한 이러한 현상은 다이아몬드형 기울기의 변화에 따라 캐비티 내부에 형성되는 유동형태의 변화로 설명할 수 있었다.

(3) 다이아몬드형 기울기 $40^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 일 때 Rayleigh-Benard 와 부력구동 자연대류가 이상적으로 혼합되어 열전달 현상이 가장 높게 나타났다.

후 기

본 연구는 2009년도 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구이다.

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) Pallares, J., Grau, F. X. and Francesc Giralt, 1999, "Flow Transitions in Laminar Rayleigh-Benard Convection in a Cubical Cavity at Moderate Rayleigh Numbers," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 42, No. 4, pp. 753~769.
- (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) Leong, W. H., Hollands, K. G. T. and Brunger,

- A. P., 1999, "Experimental Nusselt Numbers for a Cubical-Cavity Benchmark Problem in Natural Convection," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1979~1989.(6)
- Pepper, D. W. and Hollands, K. G. T., 2002, "Benchmark Summary of Numerical Studies: 3-D Natural Convection in Air-Filled Enclosure," *Numer. Heat Transfer Part A*, Vol. 42, pp. 1~11.
- (7) Myong, H. K., 2006, "Numerical Study on the Characteristics of Natural Convection Flows in a Cubical Cavity," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 30, No.4, pp. 337~342.
- (8) Myong, H. K., Kim, J. E. and Ahn, J. K., 2005, "Numerical Study on the Nature of Natural Convection in a Cubical-Cavity," *Proc. of the KSME(B) Fall annual Meeting*, pp. 176~181.
- (9) 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, No. 9, pp. 1049~1056.
- (10) Myong, H. K., Kim, J. T. and Kim, J. E., 2005, "Development of 3D Flow Analysis Code using Unstructured Grid System(2nd Report, Code's Performance Evaluation)," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 9 pp. 1057~1064.
- (11) Myong, H. K. and Kim, J., 2006, "Development of a Flow Analysis Code using an Unstructured Grid with the Cell-Centered Method," *J. of Mechanical Science and Technology (KSME Int. J.)*, Vol. 20, No.12, pp.2218~2229.
- (12) Mamun, M. A. M., Leong, W. H., Hollands, K. G. T. and Johnson, D. A., 2003, "Cubical-Cavity Natural-Convection Benchmark Experiments: an Extension," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3655~3660.
- (13) 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" [International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 3655-3660]," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1224.
- (14) Myong, H. K., and Kim, J. E., 2006, "Numerical Study on Slanted Cubical-Cavity Natural Convection," *Trans. of SAREK*, Vol. 18, No. 9, pp. 722~728.
- (15) Myong, H. K., 2007, "Numerical Study on Natural Convection in a Doubly-Inclined Cubical-Cavity," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 31, No. 12 pp.1002~1008.