

<학술논문>

이중으로 경사진 3차원 캐비티내 자연대류 열전달현상에 관한 수치해석적 연구

명 현 국*

(2007년 7월 24일 접수, 2007년 10월 15일 심사완료)

Numerical Study on Natural Convection in a Doubly-Inclined Cubical-Cavity

Hyon Kook Myong

Key Words: Numerical Study(수치해석적 연구), Natural Convection(자연대류), Cubical Cavity(3차원 캐비티), Rayleigh Number(Ra수), Benchmark Solution(검증용 해)

Abstract

Natural convection flows in a doubly-inclined cubical air-filled cavity are numerically simulated by a solution code(PowerCFD) using unstructured cell-centered method. For a physical realizability, the cavity has one pair of opposing isothermal faces at different temperatures, T_h and T_c , respectively, the remaining four faces having a linear variation from T_c to T_h . The paper redefines a new doubly-inclined orientation for the cubical-cavity benchmark problem. Special attention is paid to three-dimensional thermal characteristics in natural convection according to the new orientation at $Ra = 4 \times 10^4$. 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 face has a maximum value at the doubly-inclined angle ranging from 40° to 45° . We also report the effect of new orientation on the type of temperature structure in a doubly-inclined cubical-cavity.

기호설명

α : 다이아몬드형 캐비티의 기울기($^\circ$)
 β : 열팽창계수(1/K)
 C_p : 비열(J/kg·K)
 g : 중력가속도(m/s^2)
 h : 대류열전달계수($W/m^2 \cdot K$)
 k : 열전도계수($W/m \cdot K$)
 L : 캐비티의 폭(m)
 μ : 점성계수($kg/m \cdot s$)

Nu : Nusselt수($\equiv hL/k$)
 Ra : Rayleigh수($\equiv g\beta TL^3 C_p \rho^2 / \mu k$)
 ρ : 밀도(kg/m^3)
 T : 온도(K)
 ψ : 수평면에 대한 캐비티 z 축의 기울기($^\circ$)
 θ : 수평면에 대한 캐비티 y 축의 기울기($^\circ$)
 x : 고온 벽으로부터의 거리(m)

1. 서론

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

공기로 가득 찬 3차원 캐비티 내에서의 자연대류현상은 전자 및 기계부품의 냉각과 열에너지 저장시스템 등에서 흔히 볼 수 있는 현상으로 공

학적인 관점에서 매우 중요한 자연현상이다. 따라서 현재까지 단순한 기하학적 형상을 가지는 3차원 정육면체 캐비티 내의 자연대류 유동에 대한 연구가 수치해석적 및 실험적 방법으로 다양하게 행하여져왔다. 대표적인 수치해석방법을 통한 선행연구들로서 Fusegi et al.⁽¹⁾은 온도가 다른 두 수직 벽을 가지는 3차원 캐비티 내에서 발생하는 부력구동(buoyancy-driven) 자연대류의 유동형태와 특성에 관하여 언급하였다. 반면 Pallares et al.^(2,3)은 온도가 다른 두 수평면을 가지는 3차원 캐비티 내에서 발생하는 Rayleigh-Benard 자연대류의 유동형태와 특성을 기존의 연구결과들과 비교 검토하였다. 그런데 기존의 수치해석적 연구들에선 온도가 서로 다른 두 벽면을 제외한 나머지 벽면들에 대해 단열조건으로 주어져 있다. 그러나 공기로 가득 찬 캐비티 내의 자연대류 유동에 대한 실제 실험에서는 이들 수치해석적 연구에서 제시된 조건과 같이 완벽하게 벽면을 단열시키는 것은 사실상 불가능하다.⁽¹⁻³⁾ 따라서 Leong et al.^(4,5)은 밀폐된 3차원 캐비티 내에서 발생하는 자연대류현상을 이해하기 위해 물리적으로 타당한 즉, 실험적인 방법으로 실현이 가능한 검증용 해(benchmark solution)를 수치계산결과와 더불어 제시하였다. 이들은 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 사용하였다. 특히 이들은 Fig. 1에서 $\psi = 0^\circ$ 인 단순한 형태의 캐비티에 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 높게 나타난다고 보고하였다. 참고로 Leong et al.⁽⁴⁾이 제시한 이 검증용 해는 2001년 개최된 ICHMT 2nd Int. Symp. on Advances in Computational Heat Transfer에서 검증용 해로 선택되어 많은 연구자들에 의해 논의 검증되었다.⁽⁶⁾

최근, 명 등^(7,8)은 Leong et al.^(4,5)이 실험한 $\psi = 0^\circ$ 인 단순한 형태의 3차원 정육면체 캐비티 내 자연대류 열전달 문제를 수치해석하고 기울기 θ 의 변화에 따른 열전달 특성을 파악하였다. 연구

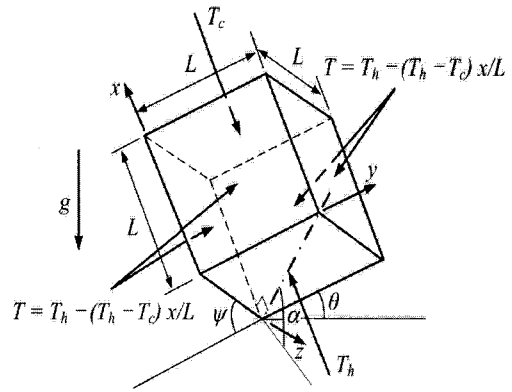


Fig. 1 Sketch defining the various orientations of the cubical cavity; $\alpha = 45^\circ$ ($\psi = 30^\circ$, $\theta = 35.264^\circ$)

결과 캐비티의 기울기가 자연대류 열전달현상을 증가(또는 감소)시킬 수 있다는 사실과 함께 자연대류 열전달현상이 가장 높게 나타나는 특성 기울기가 존재함을 제시하였다. 참고로, 이들은 수치해석을 위해 비정렬 셀 중심 방법(cell-centered method)을 채택하고 있는 3차원 유동해석코드(PowerCFD)^(9,10)를 사용하였으며, 제시된 검증용 해와의 비교-분석을 통해 유동해석코드 및 수치해석방법의 적합성도 확인하였다.

한편 Mamun et al.^(11,12)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)형($\psi = 30^\circ$, $\theta = 35.264^\circ$)에 대한 실험과 수치해석결과를 제시하였다. 그러나 이들은 한가지 특수한 기울기에 대해서 Ra 수(Rayleigh number)에 따른 평균 Nu 수의 영향만을 연구하였다. 명과 김⁽¹³⁾은 이중으로 경사진 3차원 정육면체 캐비티 내 자연대류 열전달 문제를 대상으로 Ra 수 및 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 확인하였다. 그러나 캐비티의 다이아몬드형 기울기 변화 및 Ra 수 변화가 캐비티 내부에 형성되는 열전달현상에 미치는 영향을 구조적인 측면에서 규명하지는 못하였다.

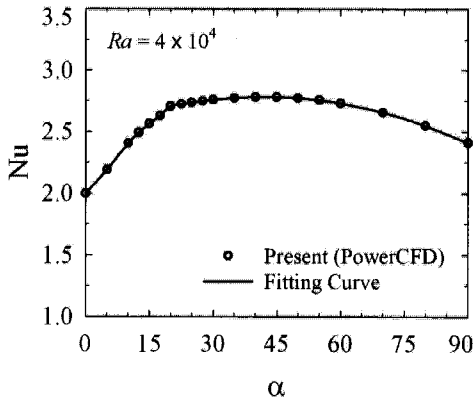


Fig. 2 Predicted mean Nusselt numbers for different diamond-type inclination angle at $Ra = 4 \times 10^4$

본 연구는 기존의 수치해석적인 연구^(7,8,12)의 연장선으로 이중으로 경사진 3차원 캐비티 내 자연대류 열전달 문제에 대해 다이아몬드형 기울기 α 를 새롭게 정의하고, 이 기울기 변화가 캐비티 내부에 형성되는 열전달현상에 미치는 영향을 온도장에 대한 구조적인 측면에서 상세히 살펴본다. 또한 단순한 형태의 캐비티($\psi = 0^\circ$ 인 경우)와 이중으로 경사진 캐비티의 기울기에 따른 열전달 특성도 함께 비교·고찰한다. 참고로 본 논문에서는 지면관계상 $Ra = 4 \times 10^4$ 인 경우에 대해서만 제시하고, Ra 수 변화에 따른 영향은 별도 논문⁽¹⁴⁾에 제시한다.

2. 수치해석

본 연구에서 대상으로 한 3차원 캐비티 형태 및 경계조건은 Mamun et al.⁽¹¹⁾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 두개의 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. 본 논문에서는 이중으로 경사진 다이아몬드형 기울기 α 를 Fig. 1에서 보는 바와 같이 고온 벽면의 어느 한 모퉁이를 수평 평면에 유지한 채 기울어졌을 때 이 고온 벽면이 수평 평면과 이루는 각도로 단순하게 정의하기로 한다. 이와 같이 새롭게 정의한 기울기는 이중으로 경

Table 1 Comparison of the numerical solution with the experimental results for Nusselt numbers on the cold wall ; $Ra = 4 \times 10^4$

α	$Nu(Ra = 4 \times 10^4)$	
	Experiments ^(4,11)	Present Prediction
0°	2.018 ± 0.017	2.0004
45°	2.763 ± 0.033	2.7822

사진 다이아몬드형 캐비티 형태를 유지하면서 기울기 변화에 따라 Rayleigh-Benard 자연대류에서 부력구동 자연대류로 자연스럽게 바꾸게 할 수 있으며, Mamun et al.^(11,12)이 제시한 특수한 각도($\psi = 30^\circ$ 와 $\theta = 35.264^\circ$)의 다이아몬드형 캐비티 형태를 하나의 변수 $\alpha = 45^\circ$ 로 용이하게 나타낼 수 있다. 또한, 기울기 정의는 다르나 단순한 캐비티($\psi = 0^\circ$ 인 경우)의 기울기 θ 에 따른 열전달 특성과의 비교도 용이한 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이하 새로운 기울기 α 에 따른 열전달 특성에 관해 고찰한다.

본 연구를 위해 사용된 지배방정식은 무차원화된 3차원 층류 Navier-Stokes 방정식과 에너지 방정식으로, 이 식들은 자체 개발한 해석코드(PowerCFD)^(9,10)를 사용하였으며, 대류항 계산에는 계산의 정확도를 높이기 위해 2차 중심차분법을 사용하였다. 참고로 본 연구를 위해 사용한 해석코드^(9,10)의 적합성과 수치해석의 타당성 및 제어 체적수에 따른 수치계산의 비의존성은 이미 기존 연구^(7,8,13)에서 Leong et al.^(4,5)의 연구결과뿐만 아니라 Mamun et al.⁽¹¹⁾에 의해 새롭게 제시된 실험 결과와의 비교·검증을 통하여 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 Ra 수가 4×10^4 일 때 약 53만($81 \times 81 \times 81$) 개의 검사체적을 가지는 비등간격 비정렬 육면체 격자를 사용하여 예측한 결과를 Table 1을 포함한 이하의 모든 수치해석결과로 제시한다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 $Ra = 4 \times 10^4$ 일 때 α 의 변화에 따라 저온벽면에서 예측된 평균 Nu 수에 대한 상관관계를 나타낸 것이다. 참고로 본 연구를 통해 예측된 저온벽면에서의 평균 Nu 수는 Table 1에서 보는 바와 같이 α 가 0° 와 45° 일 때에 대해 검증용 해

로 제시된 Leong et al.^(4,5)과 Mamun et al.⁽¹¹⁾의 실험 최대오차 범위 내에 있어, 결과의 신뢰성을 반증해 주고 있다. 예측결과를 보면 α 에 따라 예측된 평균 Nu 수의 변화는 밀폐된 3차원 캐비티에서 α 에 따른 자연대류 열전달현상의 변화를 명확히 보여 주고 있다. 즉, 그림에서 보는 바와 같이 α 가 0° 에서 20° 로 증가함에 따라 저온벽면상의 평균 Nu 수는 급격하게 증가하다가, α 가 20° 인 지점에서 급변하는 변곡점을 가짐을 확인할 수 있다. 그리고 α 가 20° 보다 클 때 평균 Nu 수는 그 차이를 거의 확인할 수 없을 정도의 완만한 경사로 증가하고, $40^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 일 때 최대 평균 Nu 수인 2.7832를 나타낸다. 이와는 반대로 α 가 45° 를 초과하여 90° 로 증가하면서 평균 Nu 수는 다시 완만하게 감소함을 확인할 수 있다. 따라서 밀폐된 3차원 캐비티 내에서 다이아몬드형 기울기인 α 에 따라 자연대류 열전달현상이 뚜렷하게 증가(또는 감소)될 수 있음과 함께 자연대류 열전달현상은 $40^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 일 때 최대가 됨을 확인할 수 있다.

한편, $Ra = 4 \times 10^4$ 일 때 이중으로 경사진 캐비티에서 저온벽면상의 평균 Nu 수를 단순한 캐비티($\psi = 0^\circ$ 인 경우)에서의 값과 비교해 보면 다음과 같다. 먼저, $\alpha = 0^\circ$ 인 경우는 Rayleigh-Benard 자연대류 현상으로 두 경우가 똑같은 형상과 조건을 가지므로 동일한 값을 가진다. 그러나 $\alpha = 90^\circ$ 인 부력구동 자연대류인 경우에 이중으로 경사진 캐비티에서 저온벽면상의 평균 Nu 수는 2.4114로, 단순한 형태의 캐비티($\psi = 0^\circ$ 와 $\theta = 90^\circ$) 경우⁽⁷⁾의 2.323 보다 약 4% 정도 높게 예측되고 있다. 이것은 캐비티가 놓이는 기하학적 형태에 따른 차이로 열전달면에서 단순한 형태의 캐비티보다 이중으로 경사진 다이아몬드형 캐비티인 경우가 더 우수함을 나타내고 있다. 또한 이중으로 경사진 경우의 최대 평균 Nu 수는 $40^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 일 때 2.7832로, 단순한 형태의 캐비티($\psi = 0^\circ$ 와 $\theta \approx 50^\circ$) 경우⁽⁷⁾의 2.574 보다 약 8% 정도 높게 예측되고 있다. 결과적으로, 이중으로 경사진 캐비티인 경우가 단순한 캐비티 경우보다 모든 기울기에 걸쳐 저온벽면상의 평균 Nu 수가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 열전달면에서 단순한 형태의 캐비티보다 이중으로 경사진 다이아몬드형 캐비티인 경우가 모든 기울기에 대해 더 우수함을 입증해 주고 있다.

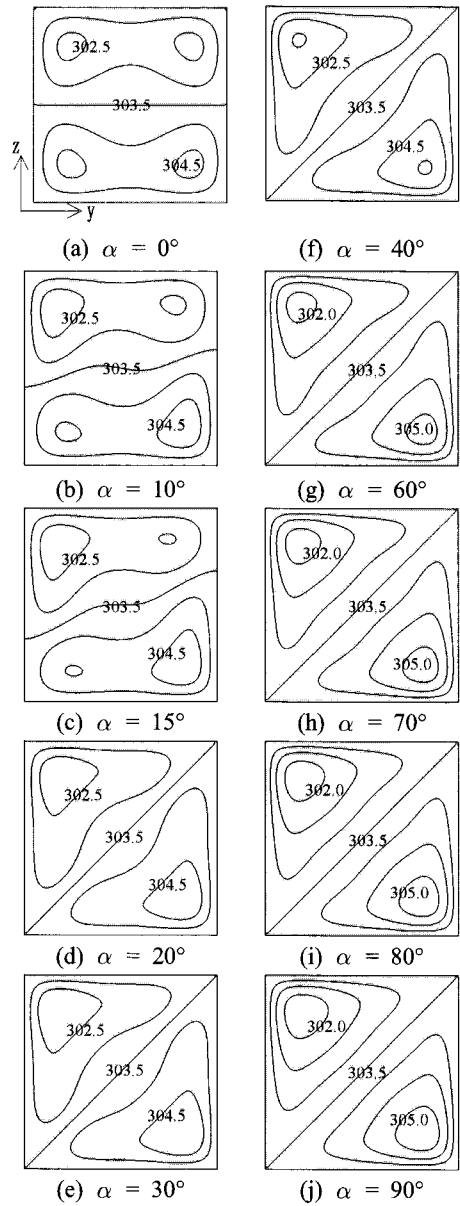


Fig. 3 Isotherm for the middle plane($x/L = 0.5$) at $Ra = 4 \times 10^4$

한편, 본 연구에서는 이미 Fig. 2를 통해 α 가 약 20° 일 때 저온 벽면에서의 평균 Nu 수가 급변하는 변곡점을 가지는 특이현상을 확인하였다. 그런데 이것은 Pallares et al.^(2,3)이 제시한 방법과 유사하게 α 변화에 따른 등온선의 구조적인 형태를 통해 설명할 수 있다. 참고로 Pallares et al.^(2,3)은 Rayleigh-Benard 자연대류현상($\alpha = 0^\circ$ 인 경우)의

열전달특성을 Ra 수와 Pr 수의 변화에 따라 고온 벽면상의 국소 Nu 수 분포와 $x/L = 0.5$ 인 중앙평면에서의 수직속도선도의 구조적인 형태를 통하여 설명하였다.

Fig. 3은 $Ra = 4 \times 10^4$ 일 때 다이아몬드형 기울기 α 의 증가에 따라 캐비티 내부 $x/L = 0.5$ 인 중앙평면($y-z$ 평면)에 형성되는 등온선도를 나타낸다. 그림에 나타난 것과 같이 α 가 약 20° 인 변곡점을 기준으로 내부온도 형태가 크게 달라짐을 확인할 수 있다. 먼저 수직 방향으로 온도구배가 존재하는 Rayleigh-Benard 자연대류 현상만이 존재하는 α 가 0° 인 경우에는 Fig. 3(a)에 나타난 것과 같이 $x/L = 0.5$ 인 중앙 $y-z$ 평면에서 서로 대칭적인 형태를 가지는 두개의 상승 봉우리와 하강 봉우리를 가지는 원셀(one cell) 온도형태이다. 반면 마주보는 두개의 수직 벽 사이의 온도차 때문에 발생하는 부력구동 자연대류 현상만이 존재하는 α 가 90° 인 경우는 Fig. 3(j)에 나타난 것과 같이 $x/L = 0.5$ 인 중앙 평면에서 대각선을 기준으로 그 형태가 서로 대칭적인 하나의 상승 봉우리와 하강 봉우리를 가지는 원셀 온도형태로 나타난다. 이러한 α 가 0° 와 90° 일 때의 전형적인 온도형태 구조를 기준으로 각각의 α 에 따라 형성되는 온도형태의 구조적인 변화를 관찰할 수 있다. 즉, α 가 0° 에서 20° 로 증가할수록 캐비티 내부에 형성되는 온도형태 구조는 α 가 0° 일 때 대칭적이던 두개의 봉우리 구조에서 지면과 가까운 곳과 가장 먼 모퉁이 부근의 봉우리가 점점 강해지고 상대적으로 나머지 양쪽 모퉁이 쪽의 봉우리가 약해져, 결국에는 α 가 20° 일 때 하나의 봉우리 형태로 전환되는 것을 Fig. 3(c), (d)를 통하여 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 2에서 α 가 20° 일 때 급격하게 변하는 변곡점을 가지는 것이 두개의 봉우리 구조가 하나의 봉우리 구조로 그 형태가 바뀌면서 나타나는 현상임을 입증해주고 있다고 사료된다. 그리고 Fig. 3(d) ~ (j)에서 나타난 것과 같이 α 가 20° 에서 90° 로 증가하면서 상승·하강 봉우리 중심의 크기 변화는 있으나, 유동구조 형태 자체는 크게 변하지 않고 있다. 특히 Fig. 3(d) ~ (f)에서 보는 바와 같이 α 가 $20^\circ \sim 40^\circ$ 인 경우에는 상승·하강 봉우리 중심의 크기변화는 물론, 유동구조 형태 자체도 거의 변하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그러나 α 의 변화에 따라 형성되는 온도형태의 구조적인 변화가 변곡점이 존재하는 α 가 20° 를 기준으로

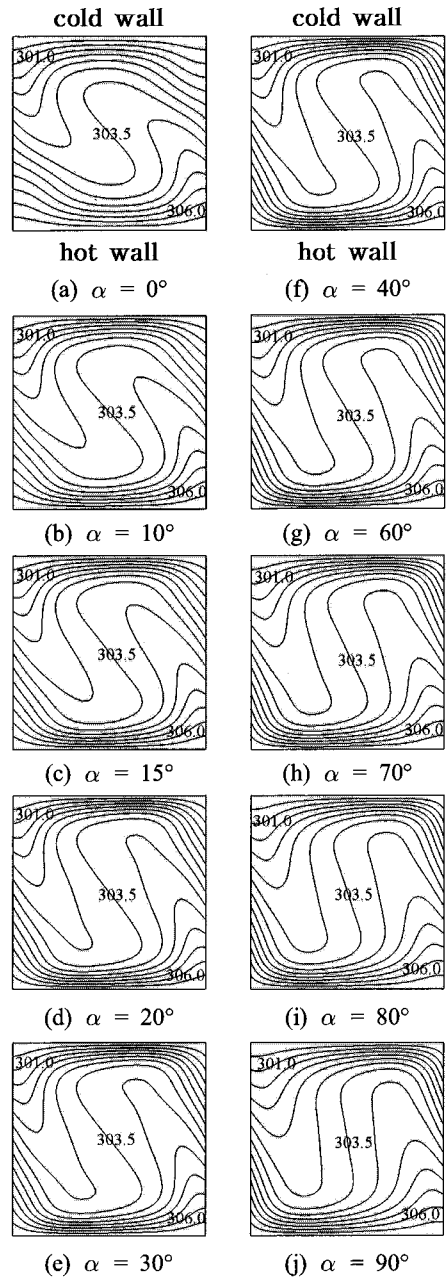


Fig. 4 Isotherm for the middle plane($y/L = 0.5$) at $Ra = 4 \times 10^4$

Rayleigh-Benard 자연대류 현상에서 부력구동 자연대류의 형태로 전환됨을 의미하는 것은 아니다. 이것은 Fig. 3(b), (c)에서 보는 바와 같이 수평선을 기준으로 대칭이던 것이 점차 대각선 방향으로 옮겨지며 대칭을 이루고 있어 이미 이 기울

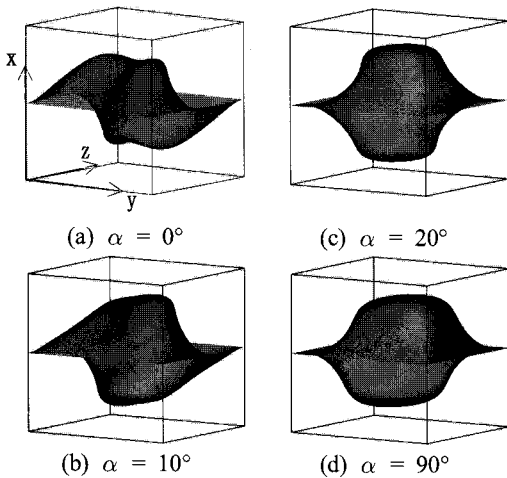


Fig. 5 Predicted isothermal-surface for primary angles at $Ra = 4 \times 10^4$

기에서도 두 자연대류 형태가 혼합되어 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 α 가 약 20° 를 기준으로 온도형태의 구조적인 변화가 생기는 것은 이중으로 경사진 캐비티의 기하학적 형태에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 4는 $Ra = 4 \times 10^4$ 일 때 다이아몬드형 기울기 α 의 증가에 따른 캐비티 내부 $y/L = 0.5$ 인 평면에 나타나는 등온선도이다. 먼저, Fig. 4(a)는 열전달이 고온-저온 벽면 근처의 열전도 현상과 캐비티 중심부에서 형성되는 등온선들의 기울기 변화로부터 확인할 수 있듯이 캐비티의 중심에서 형성되는 유체의 와동에 의한 열의 이류현상으로 이루어지는 Rayleigh-Benard 자연대류 현상의 전형적인 등온선도를 보여주고 있다. 반면 Fig. 4(j)는 선형온도분포를 가지는 벽면에 인접하여 회전하는 와동에 의한 열의 이류현상과 정체된 중심영역에서 열전도현상이 발생하는 부력구동 자연대류 현상의 전형적인 등온선도이다. 이러한 α 가 0° 와 90° 일 때의 전형적인 등온선도 형태를 기준으로 Fig. 4에 나타난 각각의 α 에 따라 형성되는 등온선도 결과로부터 두 자연대류 현상의 혼합 정도를 평가할 수 있다. 즉, 캐비티의 다이아몬드형 기울기 α 가 증가함에 따라 Rayleigh-Benard 자연대류 현상($\alpha = 0^\circ$ 인 경우)에서 부력구동 자연대류 현상($\alpha = 90^\circ$ 인 경우)으로 점진적으로 변화되어 가는 양상을 명확히 알 수 있다. 즉, 두 경계면 온도의 평균 온도인 303.5 K의 등온선을 보면 두

가지 자연대류 현상의 혼합으로 캐비티의 기울기가 $\alpha = 0^\circ$ 에서 최고 Nu 수를 가지는 약 40° 까지 증가할수록 캐비티의 중심영역을 기점으로 반전되는 현상이 뚜렷하다가 그 이상의 기울기에서는 다시 그 현상이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 캐비티의 기울기가 캐비티의 중심을 기점으로 일어나는 활발한 이류현상에 상당한 영향을 미치고 있으며, 최대 열전달이 발생하는 $40^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 일 때 Rayleigh-Benard 와 부력구동 자연대류가 이상적으로 혼합되고 있음을 나타내고 있는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 $Ra = 4 \times 10^4$ 일 때 주요 다이아몬드 기울기 α 의 변화에 따라 형성되는 등온 평면도를 입체적인 3차원 형태로 나타낸다. 이미 Fig. 3과 Fig. 4를 통해 확인한 것과 같이 α 가 0° 일 때 두 개의 봉우리를 가지는 원셀 구조에서 기울기가 커지면서 지면과 가까운 곳과 가장 먼 모퉁이 부근의 봉우리가 점점 강해지고 상대적으로 나머지 양쪽 모퉁이 쪽의 봉우리가 점점 약해져 약 20° 가 되었을 때 결국은 하나의 상승-하강 봉우리를 가지는 원셀 구조로 전환되고 있다. 그리고 이러한 하나의 상승-하강 봉우리를 가지는 원셀 구조는 α 가 20° 부터 90° 가 될 때까지 그 형태를 유지하고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 Mamun et al.^(11,12)이 제시한 실험모델인 이중으로 경사진 3차원 캐비티 내 자연대류 열전달 문제에 대해 다이아몬드형 기울기 α 를 새롭게 정의하고, 이 기울기 변화가 캐비티 내부에 형성되는 열전달현상에 미치는 영향을 수치해석을 통해 온도장에 대한 구조적인 측면에서 상세히 살펴보았다. 수치해석은 비정렬 셀 중심 방법을 채용하고 있는 3차원 유동해석 코드(PowerCFD 코드)^(9,10)를 사용하여 $Ra = 4 \times 10^4$ 인 경우에 대해 수행하였다. 또한 단순한 형태의 캐비티($\psi = 0^\circ$ 인 경우)와 이중으로 경사진 캐비티의 기울기에 따른 열전달 특성도 함께 비교·고찰하였다. 연구결과,

- (1) 이중으로 경사진 3차원 캐비티에서 다이아몬드형 기울기는 자연대류 열전달현상을 증가(또는 감소)시킬 수 있음이 확인되었다.
- (2) 열전달면에서 단순한 형태의 3차원 캐비티

보다 이중으로 경사진 다이아몬드형 3차원 캐비티인 경우가 모든 기울기에 대해 더 우수한 것으로 나타났다.

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

(4) 이중으로 경사진 3차원 캐비티에서 다이아몬드형 기울기의 변화에 따른 캐비티 내부에 형성되는 유동형태의 구조는 $\alpha \approx 20^\circ$ 를 기점으로 약한 두개의 봉우리를 가지는 평행축선 대칭의 원셀(one cell)구조에서 강한 하나의 봉우리를 가지는 대각 평면 대칭의 원셀 구조로 전환되는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 서울시 산학연 협력사업(2005년도 신기술연구개발 지원사업)의 연구비를 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, "Experimental Nusselt Numbers for a Cubical-Cavity Benchmark Problem in Natural Convection," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1979~1989.
- (5) 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.
- (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., 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. 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) 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.
- (12) 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, p. 1224.
- (13) 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.
- (14) Myong, H. K., 2007, (in preparation).