

비정렬 셀 중심 방법에 의한 3차원 캐비티내의 자연대류 현상에 관한 수치해석

명 현 국¹, 김 종 은²

NUMERICAL SIMULATION OF NATURAL CONVECTION IN A CUBICAL-CAVITY BY UNSTRUCTURED CELL-CENTERED METHOD

H. K. Myong and J. E. Kim

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 , the remaining faces having a linear variation from T_c to T_h are numerically simulated by a new solution code(PowerCFD) using unstructured cell-centered method. Solutions are obtained for configurations with a Rayleigh number as high as 105 and three inclination angles θ of the isothermal faces from horizontal: namely $\theta=0, 45$ and 90° . Interesting features are presented in detail and comparisons are made with benchmark solutions and experimental results 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 cavity with differentially heated walls.

Key Words: 3차원 캐비티(Cubical Cavity), 비정렬 셀 중심 방법(Unstructured Cell-Centered Method), 자연대류(Natural Convection), 수치해석(Numerical Simulation), 비정렬격자(Unstructured Grid), Ra수(Rayleigh Number), 검증용 해(Benchmark Solution)

1. 서 론

공기로 가득 찬 3차원 캐비티내에서의 자연대류 유동해석은 전자 및 기계 부품의 냉각, 열에너지 저장시스템, 칸막이가 존재하는 공간 사이에서의 화재 등과 같이 공학적인 면에서 매우 중요하다. 따라서 단순한 기하학적 형상을 가지는 3차원 정육면체 캐비티내의 자연대류 유동은 수치해석 방법을 위해 적절하고 타당한 기본적인 모델로 자주 제시되어진다. Fusegi 등[1]은 수치해석적 방법을 통하여 온도가 다른 두 수직벽을 가지는 3차원 캐비티내에서 발생하는 유동의 형태와 특성을 언급하였고, Pallares 등[2]은 수치해석 방법으로 온도가 다른 두 수평면을 가지는 3차원 캐비티내에서 유동형태와 특성을 기존의 연구 결과들과 비교 검토하였다. 그런데 이 두 가지 연구 모두 온도가 다른 두 벽면을 제외한 나머지 벽면

들에 대해서는 단열조건으로 주어졌다. 그러나 특히, 공기로 가득 찬 캐비티내에서는 수치해석을 위해 사용한 경계조건들과 같이 실제실험에서 완벽하게 벽면을 단열시키는 것은 불가능하다[1-3]. 따라서 Leong 등[3]은 3차원 캐비티내에서의 자연대류현상을 이해하기 위해 물리적으로 타당한 즉, 실험적인 방법으로 실현이 가능한 검증용 해(benchmark solution)로 두개의 다른 온도를 가지는 등은 벽과 나머지 다른 네 측면의 벽이 높은 온도 벽에서 낮은 온도 벽으로 선형온도변화를 가지는 등은조건을 경계조건으로 사용하여 공기로 가득 찬 3차원 캐비티내 자연대류 유동을 Ra수(Rayleigh Number)와 캐비티의 기울기 θ 를 바꾸어가며 실험과 함께 수치해석하고 결과를 제시하였다.

본 연구의 목적은 앞에서 Leong 등[3]이 제시한 새로운 검증용 해를 비정렬 셀 중심 방법을 채용하고 있는 3차원 유동해석코드(PowerCFD 코드)[4]를 사용하여 각각의 Ra수(104, 4×104 과 105($\theta = 90^\circ$ 일 경우는 $Ra = 106$ 추가))에서 캐비티의 기울기($\theta = 0^\circ, 45^\circ$ 및 90°)를 달리 하며 수치해석한 후, 예측된 결과를 통해 Ra수의 증가와 3차원 캐비티의 기울기 변화

1 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

2 학생회원, 국민대학교 대학원 기계공학과

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

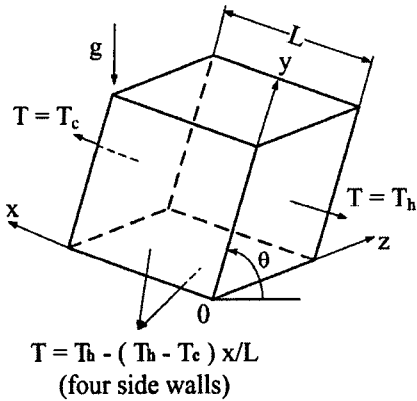


Fig. 1 Sketch defining the cubical cavity

가 캐비티 내부에 형성되는 유동장과 열전달현상에 미치는 영향을 알아보고, 그에 따른 열전달 특성을 규명함에 있다. 아울러 낮은 온도 벽에서의 평균 Nu수(Nusselt number)를 예측하여 기존의 실험결과 값들과 비교함으로써 본 연구에서 사용된 수치해석 방법의 3차원 열/유체 유동해석 성능도 함께 검증하였다.

2. 수치해석

본 연구에서 대상으로 한 3차원 정육면체 캐비티의 형태와 경계조건은 Leong 등[3]의 실험조건과 같다. 즉, Fig. 1에서와 같이 $x = 0$ 인 평면은 고온($T_h = 307\text{K}$)이며, $x = L (= 0.1272\text{ m})$ 인 평면은 저온($T_c = 300\text{K}$)인 두개의 다른 온도를 가지는 등온 벽이 존재하고, 그 이외의 다른 네 측면 벽은 낮은 온도의 벽에서 높은 온도의 벽으로 선형온도분포(LTP; linear temperature profile) $T = T_h - (T_h - T_c)x/L$ 를 가지는 등온 조건을 사용하고 있다. 또한 3차원 캐비티의 기울기 변화가 캐비티 내부에 형성되는 유동장 및 온도장에 미치는 영향을 알아보기 위하여 캐비티의 기울기는 다음의 세 가지의 경우로 나누어 고려한다. 마주보는 수직벽면 중 오른쪽($x=0$) 벽면이 가열되는 $\theta = 90^\circ$ 인 경우, 마주보는 수평벽면 중 아래면이 가열되는 $\theta = 0^\circ$ 인 경우, 그리고 높은 온도벽면과 낮은 온도벽면이 45° 로 기울어진 $\theta = 45^\circ$ 인 경우이다.

본 연구에서 사용한 코드(PowerCFD)는 자체 개발한 코드로 이 코드는 비정렬 셀 중심 방법을 채택하여 열/유체 유동 문제를 해석할 수 있는 3차원 해석 알고리즘을 사용하고 있으며, 이미 2차원 열/유체 유동해석 성능이 입증되어 있다 [4,5].

본 연구에서 사용된 지배방정식은 무차원화된 3차원 층류 N-S 방정식과 에너지방정식으로, 이들 식을 풀기 위해 대류

항 계산에는 계산의 정확도를 위해 2차 중심차분법(2nd-order central differencing scheme)을 사용하였다.

또한, 본 연구에서 사용된 격자계는 비등간격 비정렬격자계이며, 종속변수들의 구배값이 큰 벽면에 밀집된 $15 \times 15 \times 8$ CV, $31 \times 31 \times 16$ CV, $61 \times 61 \times 31$ CV 및 $121 \times 121 \times 61$ CV와 같이 육면체로 구성된 격자를 사용하여 격자계에 대한 비의존성을 확인하였고, 이하에는 대표적인 격자계인 $61 \times 61 \times 31$ 인 격자계를 사용하여 수치해석한 결과를 제시한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 $\theta = 90^\circ$ 의 경우

먼저 수치계산의 타당성을 확인하기 위하여 Table. 1에는 $\theta = 90^\circ$ 인 경우 각 Ra수 대해 저온을 가지는 벽면에서 평균 Nusselt수(Nu수)를 검증용 해로 제시된 Leong 등[3]의 실험결과와 비교하여 나타내었다. 여기서, Nu수는 단순형상인 2차원 정사각형 캐비티에서 평행한 두 수직벽의 온도차로 발생하는 자연대류에서 Hortmann 등[6]의 정의와 같이 캐비티를 좌우로 가로지르는 실제 열유속을 순수전도로부터 얻어지는 열유속으로 나눈 값으로 정의되며, 실제 열유속은 x 가 일정한 격자라인을 따라 제어체적면을 통과하는 대류 및 확산 플럭스를 합한 값으로 구해진다. Table. 1에 나타난 것과 같이 본 연구를 통해 각각의 Ra수에 따라 저온을 가지는 벽면에서 예측된 평균 Nu수는 Leong 등[3]이 실험에서 얻은 Nu수 오차범위 안에 드는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 2는 $\theta = 90^\circ$ 일 때 Ra수의 증가에 따라 캐비티 내부의 $z = L/2$ 인 대칭면에서 형성되는 열유동장과 유동장의 변화를 보여주고 있다. 결과를 보면 그림 왼편의 등온선도는 캐비티의 중심영역을 기점으로 반전되는 현상이 발생하고 고온, 저온 벽면 근처에서 온도구배는 Ra수가 증가할수록 증가함을 확인 할 수 있다. 이러한 사실은 기존의 수치해석적 연구[1]에서 언급한 것과도 일치한다. 또한 그림 오른편의 벡터선도는 Ra수가 증가할수록 캐비티 중심영역에서 발생하는 정지영역의 크기가 점점 증가해 가는 것을 보여주고 있다. 이러한 3차원 캐비티내의 대칭면에서의 등온선도와 벡터선도의 형태는

Table. 1 Comparison of the Averaged Nusselt Numbers measured and predicted at $\theta = 90^\circ$

Ra	Nu	
	Measured Nu LTP side-walls[3]	Present
10^4	1.520 ± 0.015	1.504
4×10^4	2.337 ± 0.020	2.324
10^5	3.097 ± 0.028	3.106
10^6	6.383 ± 0.070	6.448

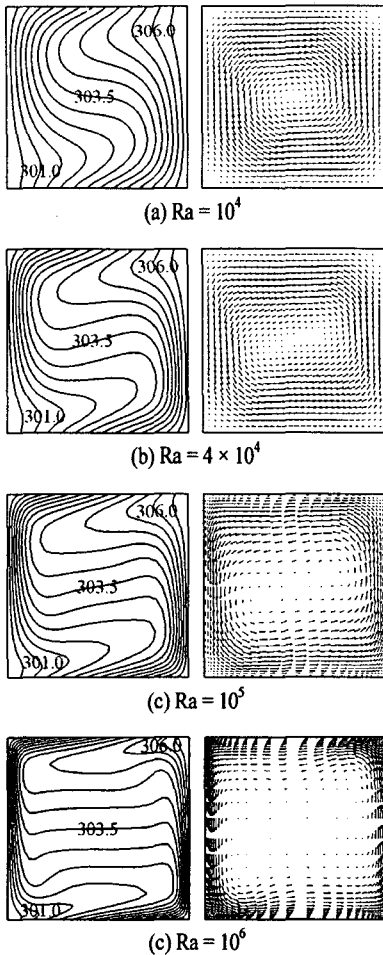


Fig. 2 Isotherms and vector plots for different Rayleigh numbers at the symmetry plane and $\theta = 90^\circ$

2차원 사각형 캐비티내의 자연대류에서 예측된 등온선도 및 벡터선도의 형태와 거의 유사하게 나타나고 있는데, 이 결과로부터 $\theta = 90^\circ$ 일 때는 2차원 사각형 캐비티로 가정하고 수치해석을 하는 기존의 수치해석 방법이 타당함을 확인 할 수 있다.

3.2 $\theta = 0^\circ$ 의 경우 결과

Table. 2에는 $\theta = 0^\circ$ 일 때 각각의 Ra수에 대해 저온의 벽면에서 예측된 평균 Nu수를 검증용 해[3]와 비교하여 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 각각의 Ra수에 따라 본 연구를 통해 저온의 벽면에서 예측한 평균 Nu수는 Leong 등[3]이 실험에서 얻은 Nu수 범위 안에 드는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 본 연구에서 사용된 수치해석방법이 $\theta = 0^\circ$ 인 경우 역

Table. 2 Comparison of the Averaged Nusselt Numbers measured and predicted at $\theta = 0^\circ$

Ra	Nu	
	Measured Nu LTP side-walls[3]	Present
10^4	1.246 ± 0.013	1.199
4×10^4	2.018 ± 0.017	2.0004
10^5	3.509 ± 0.035	3.536
	3.916 ± 0.042	3.947

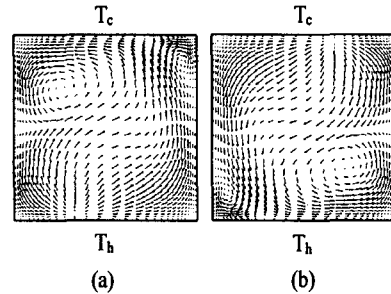


Fig. 3 Velocity plots at the symmetry plane($z=L/2$) of the flow-fields calculated at $\theta = 0^\circ$ and $Ra = 105$. (a) Initial temperature (300K ~ 303.5K), and (b) Initial temperature (303.5K ~ 307K) using $31 \times 31 \times 16$ grid size.

시 타당함을 입증한다.

한편, Table. 2 및 Fig. 3에서 보는 바와 같이 $Ra = 10^5$ 일 경우에는 초기조건에 따라 두 가지의 다른 형태(모드)의 유동이 관찰된다. 이것은 유동형태와 초기조건의 영향에 대해서 상세하게 연구한 Gomiciaga등[7]이 이미 언급하고, Leong 등 [3]의 실험을 통해서도 확인된 결과로, 실험과 같은 실제 상황에서 초기조건 즉 초기온도 값에 따라 어떤 특정한 유동의 모드로 발전하게 되면, 열전달 현상은 그 모드에서 안정적으로 남게 된다는 것이다. 본 연구에서는 어떠한 변수가 이러한 현상을 초래하는 원인인지를 알아보기 위하여 격자수(격자 밀도)에 대한 의존성 및 초기조건 특별히 초기온도조건에 대한 의존성을 여러 가지 경우의 수로 나누어서 확인하였다. 그 결과 격자의 크기에 따른 의존성은 확인 할 수 없었고, Fig. 3에 나타난 것과 같이 초기온도조건에 따라 두개의 다른 유동 형태를 얻을 수 있었다. 여기서 특이할 점은 바로 경계온도조건으로 주어진 T_h 와 T_c 의 평균온도 T_m 을 기점으로 두 가지의 다른 유동 형태로 나누어진다는 사실이다. 즉, 초기온도값을 T_m 라고 할 때, 초기온도 조건이 $300K \leq T_m < 303.5$ 로 주어졌을 경우 형성된 유동형태는 Fig. 3(a)에 나타난 것과 같으며 Cold 면의 평균 Nu수는 3.947이고, 초기온도 조건이 $303.5K \leq T_m < 307$ 로 주어졌을 경우에는 형성된 유동형태는 Fig. 3(b)에

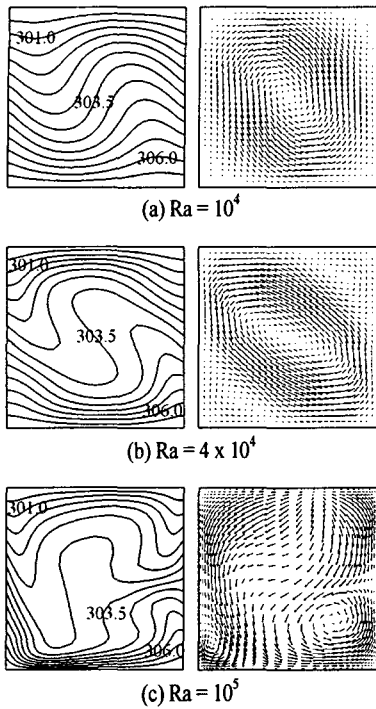


Fig. 4 Isotherms and vector plots for different Rayleigh numbers at the symmetry plane and $\theta = 0^\circ$.

나타낸 것과 같으며 Cold면의 평균 Nu수는 3.536이 얻어졌다. 이렇게 예측된 Cold면에서의 평균 Nu수는 Table. 2에서 보는 바와 같이 Leong등[3]의 실험으로 측정된 Cold 면에서의 평균 Nu수와 매우 가깝다. 이와 같은 사실로 우리는 격자의 크기 (격자밀도)에 대한 의존성이 아닌 초기온도설정으로 인한 두 개의 서로 다른 평균 Nu수와 유동 형태를 가지는 두 가지의 해법이 Ra수가 10^5 인 경우에 한하여 존재한다는 사실을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 3의 벡터선도에 대한 결과로부터 이 두 가지의 다른 유동형태가 서로 독립적인 유동형태가 아니라 하나는 다른 하나의 형태로부터 얻어질 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 이 두 개의 유동형태를 3차원 캐비티의 중심을 기점으로 간단하게 180° 회전시켜 보았을 때 하나의 유동형태는 다른 유동형태로부터 얻어진다. 이러한 사실은 어느 하나의 예측결과에서 Cold면의 평균 Nu수와 다른 예측결과에서 Hot면의 평균 Nu수가 본질적으로 일치하는 것을 통하여 확인할 수 있다.

Fig. 4는 $\theta = 0^\circ$ 일 때 Ra수에 따른 캐비티 내부의 $z = L/2$ 인 대칭면에서 형성되는 열유동장과 속도장의 변화를 보여주고 있다. $Ra = 10^4$ 와 $Ra = 4 \times 10^4$ 에서는 $\theta = 90^\circ$ 에서와 유사한 유동의 특성을 확인할 수 있다. 즉, 그림의 왼편에

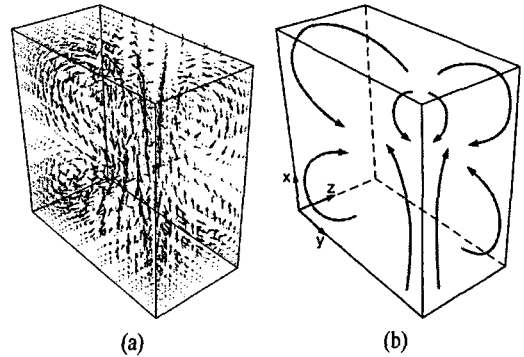


Fig. 5 3D (a) Vector plot and (b) Simple lines plot for $Ra = 105$ at $\theta = 0$

나타낸 등온선도에서와 같이 캐비티의 중심영역을 기점으로 상하로 반전되는 현상이 발생하고 고온, 저온 벽면 근처에서의 온도구배는 Ra수가 증가할수록 증가한다. 또한 벡터 선도에서 Ra수가 증가할수록 캐비티 중심영역에서 발생하는 정지영역의 크기가 점점 증가해 간다. 그러나 $Ra = 10^5$ 일 때는 앞에서 기술한 두 가지 유동형태가 기존의 단열벽 경계조건으로 2차원적으로 수치해석한 유동장의 형태와 다르며, 이는 유동의 형태가 완전한 삼차원임을 의미한다.

Fig. 5는 3차원 형상을 통하여 유동의 흐름을 모사하고, 이를 통하여 그 특이한 유동의 형태를 이해하기 위해 본 실험실에서 자체 개발한 Post-processor를 활용하여 Fig. 3(b)에 해당하는 부분을 3D 모델링으로 나타낸 것이다. 결과를 보면 먼저 Fig. 3(b)에서는 자세히 보이지 않지만 Cold면으로부터 두개의 측벽을 따라 내려온 유동은 Hot면의 중심에서 약간 왼쪽으로 치우친 부분에서 하나로 합쳐진 후 두개의 요소로 나뉘인다. 그 중 하나는 오른쪽 측벽면을 따라 올라간 후 바로 왼쪽 하부 모서리부분에 작은 와동을 형성한다. 다른 하나는 오른쪽 측벽을 따라 캐비티의 절반에 해당하는 부분까지만 상승한 후 왼쪽 방향으로 급선회하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 오른쪽 하부모서리에서도 역시 와동을 형성하는데 그 크기는 전체 캐비티의 약 1/4에 해당하는 크기이다. 그리고 Fig. 5(b)에서는 Fig. 3(b)에서 확인한 Cold면의 중심에서 약간 오른쪽으로 벗어난 부분에서 두개의 측벽을 향해 나뉘

Table. 3 Comparison of the Averaged Nusselt Numbers measured and predicted at $\theta = 45^\circ$.

Ra	Nu	
	Measured Nu LTP side-walls[3]	Present
10^4	1.614 ± 0.015	1.591
4×10^4	2.650 ± 0.027	2.547
10^5	3.492 ± 0.034	3.528

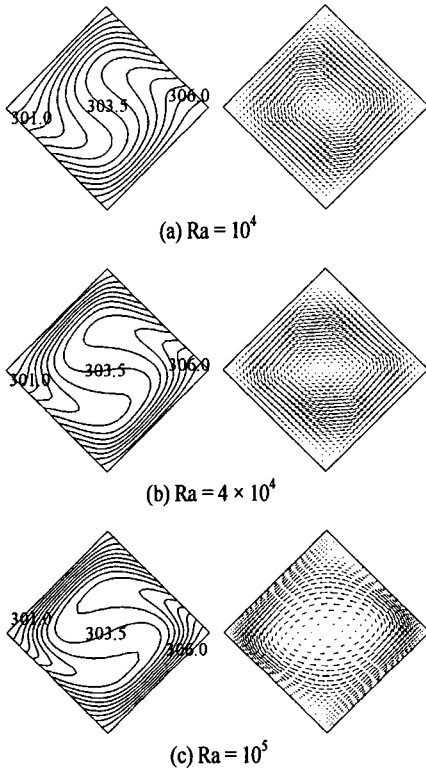


Fig. 6 Isotherms and vector plots for different Rayleigh numbers at the symmetry plane and $\theta = 45^\circ$.

지는 곳에서 여러 갈래로 나뉘는 곳이 z축을 따라 두 곳에서 생성됨을 예측할 수 있다. 이와 함께 Fig. 3(b)에서 확인된 Hot면의 중심에서 왼쪽으로 약간 치우친 부분이 결국은 전체 캐비티의 유동이 한곳에서 만나서 사방으로 흩어지는 지점이라는 것을 예측할 수 있다.

3.3 $\theta = 45^\circ$ 의 경우 결과

Table. 3에는 $\theta = 45^\circ$ 일 때 각 Ra수 대해 저온을 가지는 벽면에서 평균 Nu수를 Leong 등[3]이 실험적 방법을 통해 얻은 결과와 비교하여 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 본 연구를 통해 예측된 저온 벽면에서의 평균 Nu수는 Leong 등[3]이 실험에서 얻은 Nu수에 허용오차를 고려한 값의 범위 안, 즉 $Ra = 4 \times 10^4$ 일 경우 4%이내에 드는 것을 제외하고는 모두 1%안에 드는 것을 확인할 수 있었다. 따라서본 연구의 수치해석방법은 $\theta = 45^\circ$ 경우에도 역시 타당함을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 $\theta = 45^\circ$ 일 때 Ra수의 증가에 따라 캐비티 내부의 대칭면에서 형성되는 열유동장과 유동장의 변화를 보여주고 있다. Table. 3에서 보는 바와 같이 저온 벽면에서의 평균 Nu

수는 앞에서 언급한 $\theta = 0^\circ$ 과 90° 일 때의 각각의 Ra수에 대한 평균 Nu수보다 다소 높게 나타남을 확인 할 수 있다. 이는 고온 벽면에서 저온 벽면으로의 열확산이 앞에서 언급한 두 가지 경우($\theta = 0^\circ$ 과 90°)보다 유체에 의한 열 이류현상이 강하게 나타나기 때문임을 의미한다. 이와 같은 사실은 Fig. 6에 보여 준 등온선도와 벡터선도를 통해서도 명확히 확인할 수 있다. 즉, Fig. 6의 왼편에 나타낸 등온선도에서와 같이 캐비티의 중심영역을 기점으로 반전되는 현상은 그 형태는 $\theta = 90^\circ$ 일 경우와 다르지만 명확히 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 하지만, 앞에서 언급한 두 가지 경우에서 보다 반전되는 현상이 뚜렷하게 나타난다. 이는 $\theta = 45^\circ$ 일 때 유체유동에 의한 열확산 현상이 $\theta = 0^\circ$ 와 90° 일 때보다 훨씬 강하게 나타난다는 것을 의미한다. 이와 함께 고온과 저온 벽면 근처에서의 온도구배 또한 각각의 Ra수가 증가됨에 따라 증가되어 나타난다.

또한, Fig. 6의 오른편에 나타낸 벡터선도에서도 위와 같은 사실을 확인할 수 있다. 즉, 벡터선도에서 다른 두 가지 경우와 마찬가지로 Ra수가 증가할수록 캐비티 중심영역에서 발생하는 정지영역의 크기가 점점 증가해 간다. 또한, 기울어진 캐비티 기울기의 영향으로 정지영역의 형상에서도 차이를 나타내고 있다. 즉, $\theta = 90^\circ$ 일 경우에는 캐비티 중심에서의 정지영역의 형상이 땅콩과 같은 형상을 나타내지만, $\theta = 45^\circ$ 일 경우는 완두콩과 같은 형상이 나타난다.

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 Rayleigh수 Ra, 3차원 캐비티의 기울기인 θ 등과 같은 매개변수들에 대한 영향을 수치해석적 방법을 통하여 유동의 특성과 특이할 만한 현상을 살펴 보았다. 연구결과,

- (1) 캐비티의 기울기 θ 와는 무관하게 캐비티의 중심영역에서 3차원 캐비티내에서 순수 자연대류의 정체영역의 크기는 Rayleigh 수의 증가에 비례하여 다소 증가한다.
- (2) 캐비티의 기울기 $\theta = 45^\circ$ 인 경우 자연대류 열전달현상이 그 외($\theta = 0^\circ$ 과 90°) 두 경우 보다 높게 나타난다. (단, 위의 (1)와 (2)의 결과는 자연대류 열전달 현상의 불안정성을 가지는 $\theta = 0^\circ$ 이고 $Ra = 10^5$ 일 경우는 예외임)
- (3) 자연대류가 존재하는 정육면체의 밀폐공간에서 캐비티의 기울기 θ 는 자연대류 열전달현상을 증가(또는 감소)시킬 수 있음이 확인되었다.
- (4) 캐비티의 기울기 $\theta = 0^\circ$ 이고 $Ra = 10^5$ 인 경우 캐비티내의

자연대류 열전달현상 그 자체의 불안정성 때문에 변수 중 하나인 초기온도조건의 영향을 받아 두 가지 유동형태를 취하게 된다. 이 두 가지 유동형태는 온도가 서로 다른 두 벽면경계온도의 평균값을 기준으로 각각 다르게 형성된다. 그러나 격자의 크기(격자밀도)에 따르지 않음은 본 연구를 통하여 확인되었다.

- (5) 3차원 열/유체 유동에 대한 본 연구에서 사용한 비정렬 셀 중심방법을 사용하는 수치해석방법 및 코드(Power CFD)의 적합성과 타당성이 입증되었다.

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, p.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, p.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, p.1979-1989.
- [4] 명현국, 김종태, 2005, "비정렬격자계를 사용하는 3차원 유동해석코드 개발(제1편, 수치해석방법)," *대한기계학회 논문집*, 제29권, 제9호에 게재 예정.
- [5] 명현국, 김종태, 김종은, 2005, "비정렬격자계를 사용하는 3차원 유동해석코드 개발(제2편, 코드성능평가)," *대한기계학회 논문집*, 제29권, 제9호에 게재 예정.
- [6] Hortmann, M., Peric, M. and Scheuerer, G., 1990, "Finite Volume Multigrid Prediction of Laminar Natural Convection :Bench-mark Solution," *Int. J. for Num. Meth. in Fluids*, Vol.11, p.189-207.
- [7] Gomiciaga, R., Ramos, E., Rojas, J., and Yianneskis, M., 1992, "Natural Convection Flow Regimes in a Cavity," *Proc. of 3rd U.K. National Incorporating 1st European Conf. on Thermal Sciences*, Vol.1, p.491-497.