

캐비티 내 고 점성유체의 비정상 혼합대류에 관한 수치해석적 연구

Numerical Study of Unsteady Mixed Convection in a Cavity with High Viscous Fluid

배대석 · Cai Long Ji
D. S. Bae and Cai L. J.

(접수일 : 2009년 4월 24일, 수정일 : 2009년 8월 6일, 채택확정 : 2009년 8월 27일)

Key Words : Unsteady Mixed Convection(비정상 혼합대류), High Viscous Fluid(고 점성유체), Finite Volume Method(유한체적법), Periodic Flow(주기적 유동)

Abstract : A numerical study of unsteady mixed convection in a cavity with high viscous fluid is presented. Finite volume method was employed for the discretization and PISO algorithm was used for calculating pressure term. The parameters governing the problem are the Rayleigh number ($10^3 \leq Ra \leq 10^5$), the Reynolds number ($0 < Re \leq 1$), and the aspect ratio ($0.5 \leq AR \leq 2$). The fluid used is silicon oil, a high prandtl number fluid, $Pr = 909.1$. The results show velocity vectors and temperature distributions. It is found that the periodic flows in a cavity are observed at very low Reynolds numbers, and the period of periodic flow decreases with increasing Reynolds and Rayleigh numbers, and increases with increasing aspect ratio. Also, the Reynolds number range of periodic flow increases with increasing Rayleigh numbers and aspect ratio.

1. 서 론

캐비티 내에서의 유체유동에 의한 열전달은 전자장비의 냉각장치, 밀집형 열교환기, 태양열집열기 등과 같은 공학적인 장치에서 자주 응용되며, 실험적 및 수치해석적 방법으로 다양하게 연구되어져 왔다. 이러한 캐비티 형상에 대한 연구는 캐비티 내의 자연대류와 강제대류에 관한 것이 대부분이었지만, 최근에는 혼합대류에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

Amahmid 등¹⁾은 하부 벽에 가열 블록을 가진 수평 채널 내에서의 자연대류에 관하여 2차원 수치해석하였으며, Hasnaoui²⁾ 등은 단열된 사각블록이 일정한 간격으로 부착된 공간에서 Rayleigh수 및 가열면의 폭과 높이의 변화가 자연대류 유동과 열전달에 미치는 영향을 검토하였다. Aung³⁾은 하부가 가열된 캐비티를 가진 채널 내에서 강제대류에 의한 온도분포와 열전달계수에 관하여 실험하였고,

Yong과 Vafai^{4,5)}는 가열블록을 포함한 수평채널 내에서의 강제대류냉각에 관하여 유한요소법으로 수치해석하였다. Herman 등⁶⁾은 하부가 가열된 캐비티를 가진 채널 내에서의 강제대류에 관하여 실험적 방법으로 연구하였으며, 일정한 Re 수 영역에서 열전달이 향상됨을 보였다. Braaten과 Patankar⁷⁾는 하부 또는 상부에 캐비티를 가지고 있는 수평채널 내의 유체유동과 열전달에 미치는 부력의 영향을 연구하였으며, 부력에 의해 유발되는 이차유동이 강제대류 전반에 걸쳐 열전달을 촉진시킨다는 연구결과를 제시하였다. Wu와 Perng⁸⁾은 가열된 캐비티를 가진 수직 채널 내에서 경사 평판에 의해 생성된 와류가 혼합대류의 열전달 특성에 미치는 영향을 연구하였고, 유동구조를 바꾸는 것에 의해 열전달을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 제시하였다. 그러나 이들의 연구는 모두 정상상태 유동에 관한 것이고, 실험에서 나타나는 비정상 유동에 관한 연구는 보고되지 않았다.

최근 컴퓨터 기술의 발전과 더불어 유동현상의 기본특성인 비정상 혼합대류에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Hasnaoui 등⁹⁾은 사각 채널의 하부 벽에 등온 열원이 배열되어 있는 형상에 대한 열전

배대석(책임저자) : 부경대학교 기계공학부

E-mail : dsbae@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6188

Cai Long Ji : 부경대학교 대학원

달 특성을 연구하여 수력학적 불안정성에 기인한 비정상상태 유동 결과를 얻었다. Najam 등¹⁰⁾은 하부에 주기적으로 분포된 캐비티를 가진 수평 채널에서 저 점성유체의 비정상 혼합대류에 대하여 Re 수와 Ra 수 그리고 블록의 높이를 변수로 하여 수치적으로 연구하였다.

본 연구에서는 저 Re 수 범위($0 < Re \leq 1$)에서 Re 수, Ra 수 그리고 종횡비(AR)가 오일을 작동유체로 사용한 고 점성유체의 비정상 혼합대류 열전달과 주기적 유동에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 이는 저 Re 수 범위 내에서의 혼합대류가 비교적 약한 에너지 소산을 가진 시스템의 냉각에 중요한 역할을 하기 때문이다.

2. 수치 해석

2.1 지배방정식 및 경계조건

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 수치모델의 개략도를 나타낸다. 캐비티 밑면은 균일한 온도 T_h 로 가열되고, 나머지 벽은 단열조건이다. 채널입구로부터 균일한 U_0 와 균일한 온도 T_c ($T_h > T_c$)의 고 점성유체가 유입되어 채널을 통과한 후 유출된다.

유체는 비압축성이며, 유체의 마찰에 의한 점성소산과 복사열전달은 무시하였고, 운동량방정식의 부력항에 나타나는 밀도를 제외한 모든 물성치는 온도와 압력에 관계없이 일정하다고 가정하였다. 따라서 Boussinesq근사를 적용한 2차원 비정상 층류유동의 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

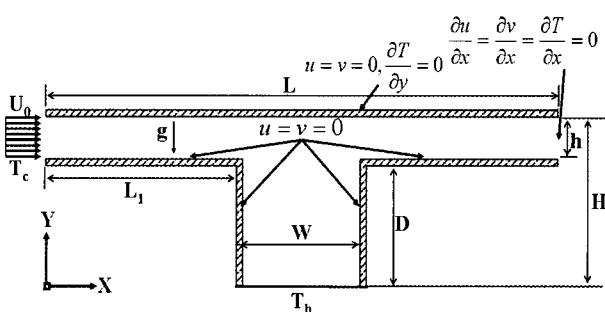


Fig. 1 Schematic diagram of the geometry investigated

x -방향 운동량 방정식

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

y -방향 운동량 방정식

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta \Delta T$$

에너지 방정식

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

여기서 u, v 는 각각 x, y 방향의 속도, T 는 온도, p 는 압력, ρ 는 밀도, g 는 중력가속도, μ, c_p, k 는 각각 점성계수, 정압비열, 열전도율을 나타낸다.

본 연구에서의 경계조건은 다음과 같다.

입구: $u = U_0, v = 0, T = T_c$

출구: $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0$

캐비티 밑면: $u = v = 0, T = T_h$

격자는 물리량들의 큰 구배가 예상되는 가열벽 근처에 조밀한 격자를 배치한 45×55 의 비균일 격자를 사용하였다.

2.2 해석방법

수치해석은 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하였으며, 압력보정은 PISO(Pressure Implicit with Splitting of Operators)알고리즘을 사용하였고, 대류항은 중심차분도식(Central Differencing Scheme)을 사용하였다. 가열벽면에서의 열전달에 대하여 유동의 열전달 특성을 나타내는 국소 Nusselt수와 평균 Nusselt수 그리고 한 주기 내의 평균 Nusselt수는 다음과 같이 정의하였다.

국소 Nusselt수:

$$Nu = \frac{hD}{k} = \frac{D}{T_h - T_c} \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (1)$$

평균 Nusselt수:

$$\overline{Nu} = \frac{1}{W} \int Nu \cdot dx \quad (2)$$

한 주기 내의 평균 Nusselt수:

$$\overline{Nu}_P = \frac{1}{\tau_P} \int_0^{\tau_P} \overline{Nu} \cdot dt \quad (3)$$

여기서, P 는 한 주기를 나타내며, τ_P 는 한 주기가 완성되는데 걸리는 시간을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 $Ra = 6.86 \times 10^4$, $AR = 1$ 그리고 $Re = 0.01$ 일 때 시간별 속도분포와 온도분포를 나타낸다. 먼저 속도분포를 살펴보면, $\tau = t + 0(s)$ 일 때 캐비티 내부의 좌우측에 각각 한 개의 셀과 캐비티의 상부에 한 개의 셀을 형성하고 있다. $\tau = t + 110(s)$ 일 때는 캐비티 내의 좌측 셀은 크기가 작아지고 우측 셀과 캐비티 상부의 셀이 혼합되어 한 개의 큰 셀을 형성하고 있으며, $\tau = t + 220(s)$ 일 때는 혼합되었던 셀이 다시 붕괴되기 시작하고, $\tau = t + 340(s)$ 일 때는 $\tau = t + 0(s)$ 일 때와 동일한 유동형태를 나타내며 새로운 주기를 시작한다. 그림에서 나타낸 바와 같이 캐비티 내부에서의 셀의 최대 속도 크기는 채널 입구로부터 유입된 강제대류 속도보다 크다. 이는 가열된 캐비티 하부로부터 생성된

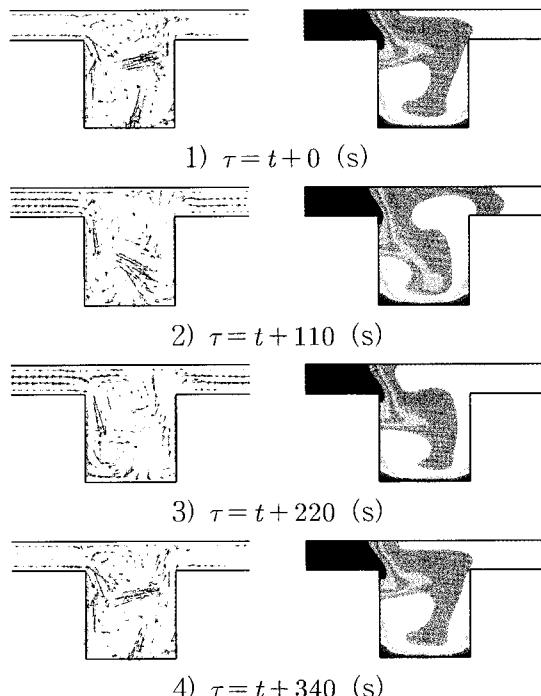


Fig. 3 Velocity vectors and temperatures patterns at different instants of a flow cycle for $Ra = 6.86 \times 10^4$, $AR = 1$ and $Re = 0.01$

자연대류의 영향으로 사료된다. 또한 온도분포를 살펴보면, 채널 입구로부터 유입된 낮은 온도의 유체는 캐비티 가열벽에 의한 자연대류의 영향으로 채널 입구 측에 머물고 있으며, 캐비티 내부에서 복잡한 온도분포의 변화를 볼 수 있다.

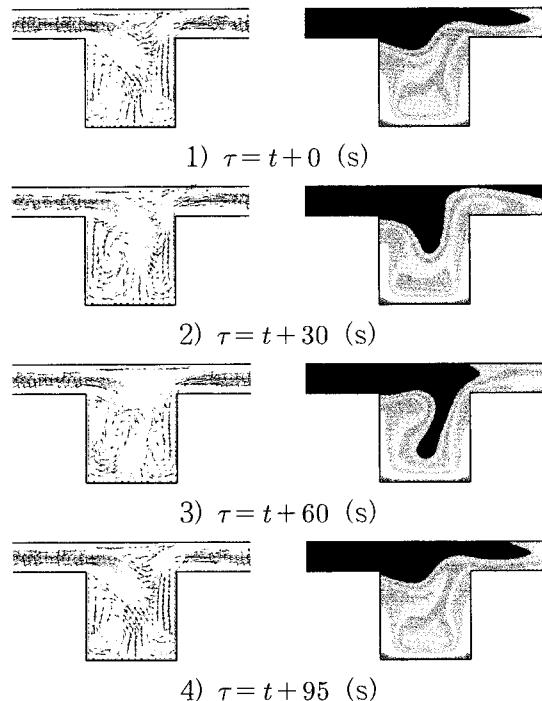


Fig. 4 Temperatures patterns and velocity vectors at different instants of a flow cycle for $Ra = 6.86 \times 10^4$, $AR = 1$ and $Re = 0.05$

Fig. 4는 $Ra = 6.86 \times 10^4$, $AR = 1$ 그리고 $Re = 0.05$ 일 때 시간별 속도분포와 온도분포를 나타낸다. 속도분포를 살펴보면, $\tau = t + 0(s)$ 일 때는 캐비티 좌우측에 각각 한 개의 셀을 형성하고 있으나, $\tau = t + 30(s)$ 일 때는 채널입구로부터 유입된 유체의 영향으로 좌측 셀은 크기가 증가하고 우측 셀은 좌측 셀에 밀려 크기가 감소하며, $\tau = t + 60(s)$ 일 때는 캐비티 내부로 깊게 침투한 유체에 의해 좌측 셀의 크기가 더 증가하고, $\tau = t + 95(s)$ 일 때는 $\tau = t + 0(s)$ 일 때와 동일한 속도분포를 나타내면서 한 개의 주기적인 유동을 완성한다. 온도분포는 채널 입구로부터 유입된 저속의 유체 유입 유동과 낮은 온도의 유체와 바닥 가열면과의 온도차에 의한 자연대류와의 상호 작용에 의해 저온의 유입유체가 점차 캐비티 내부에 깊게 침투하면서 가열된 유체와 냉각 유체와의 열교환을 하며 뚜렷한 주기적 현상을 보여주는 온도분포를 형성함을 알 수 있다.

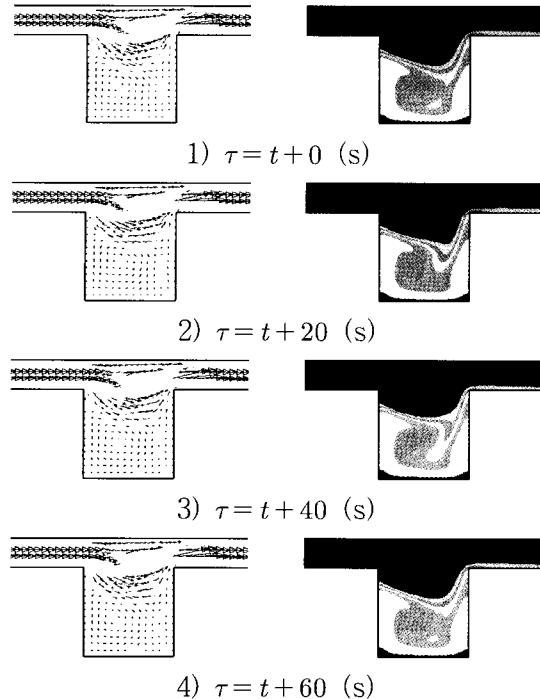


Fig. 5 Temperature patterns and velocity vectors at different instants of a flow cycle for $Ra = 6.86 \times 10^4$, $AR = 1$ and $Re = 0.4$

Fig. 5는 $Ra = 6.86 \times 10^4$, $AR = 1$ 그리고 $Re = 0.4$ 일 때 시간별 속도분포와 온도분포를 나타낸다. Re 수가 증가함에 따라 자연대류의 영향에 의한 셀 유동이 사라지고, 강제대류의 영향이 증가하면서 입구에서 유입된 유체는 캐비티 내부에 침투되지 않고 바로 유출구로 배출되면서 미약한 주기적인 유동형태를 나타낸다.

Fig. 6은 $Ra = 6.86 \times 10^4$, $AR = 1$ 일 때 Re 수가 주기에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Re 수가 증가하면 주기는 감소하였고, $Re > 0.4$ 에서는 더 이상 주기적인 유동형태는 나타나지 않았다.

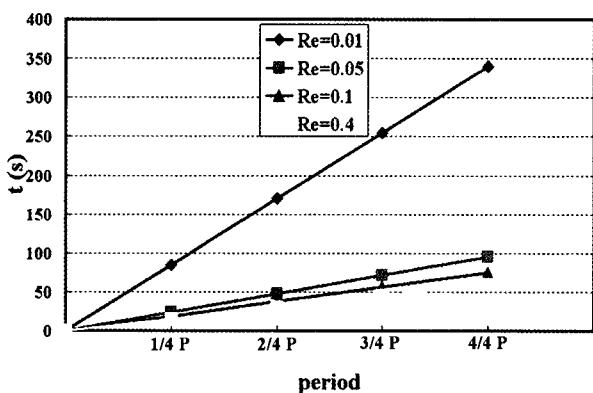


Fig. 6 Effect of Reynolds number on the periodic flows at $Ra = 6.86 \times 10^4$ and $AR = 1$

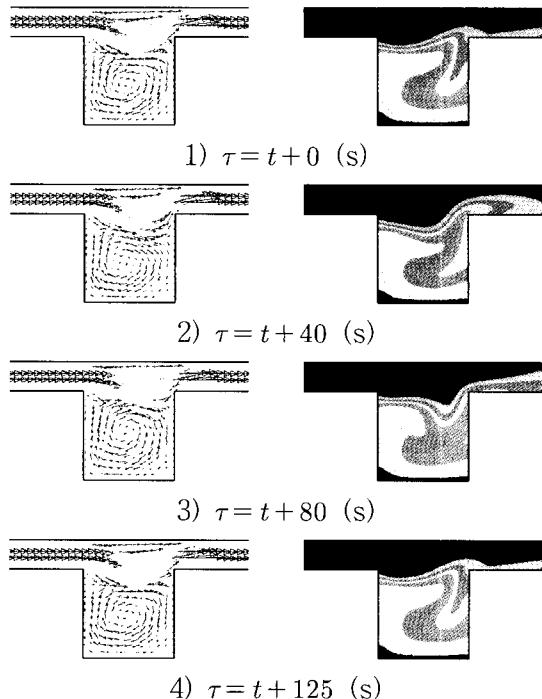


Fig. 7 Temperature patterns and velocity vectors at different instants of a flow cycle for $Ra = 3.0 \times 10^4$, $AR = 1$ and $Re = 0.05$

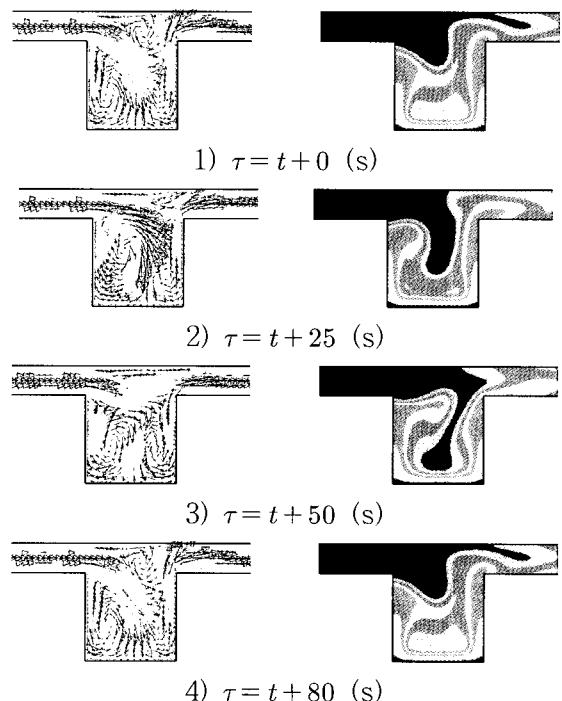


Fig. 8 Temperature patterns and velocity vectors at different instants of a flow cycle for $Ra = 1.0 \times 10^5$, $AR = 1$ and $Re = 0.05$

Fig. 7은 $Ra = 3.0 \times 10^4$, $AR = 1$ 그리고 $Re = 0.05$ 일 때 시간별 속도분포와 온도분포를 나타내고 있다. 캐비티 내부에는 한 개의 큰 셀이 대

부분 공간을 차지하고 있으며, $Ra = 6.86 \times 10^4$ 일 때 와는 달리 입구로부터 유입된 낮은 온도의 유체가 캐비티 내부에 깊게 침투되는 현상을 볼 수 없는데, 이는 캐비티 상하부의 온도차가 미약하여 부력에 의한 자연대류가 큰 영향을 미치지 못하기 때문이다.

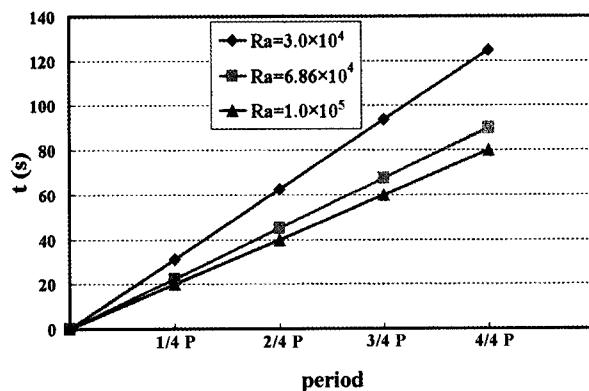


Fig. 9 Effect of Rayleigh number on the periodic flows at $AR = 1$ and $Re = 0.05$

Ra 수가 증가하면 유동장에 미치는 자연대류의 영향은 점차 커지게 되는데 이를 Fig. 8에서 볼 수 있다. Fig. 8은 $Ra = 1.0 \times 10^5$, $AR = 1$ 그리고 $Re = 0.05$ 일 때 시간별 속도분포와 온도분포를 나타낸다. Ra 수가 증가하면 캐비티 내에서 활발한 자연대류의 영향으로 입구로부터 유입된 낮은 온도의 유체가 캐비티 내부에 깊게 침투되는 것을 볼 수 있으며, 저속의 입구 유속에 의한 유동과 캐비티 내에서 발생한 자연대류 유동이 서로 영향을 미쳐 복잡한 유동형태를 나타내면서 주기적인 유동을 완성하고, 그 주기는 Ra 수의 증가에 따라 감소하였다.

Fig. 9는 $AR = 1$, $Re = 0.05$ 일 때 Ra 수가 주기에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Ra 수가 증가함에 따라 주기는 감소하였다.

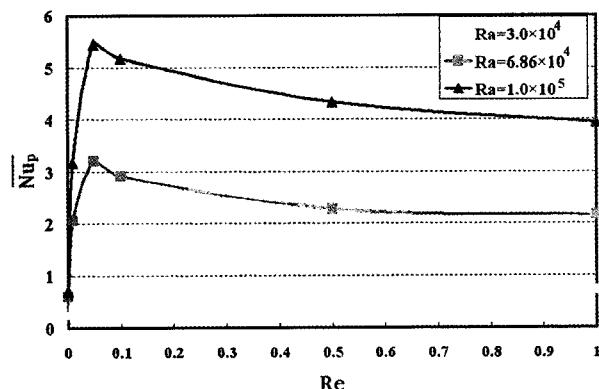


Fig. 10 \overline{Nu}_P variations versus Re for various Ra and $AR = 1$

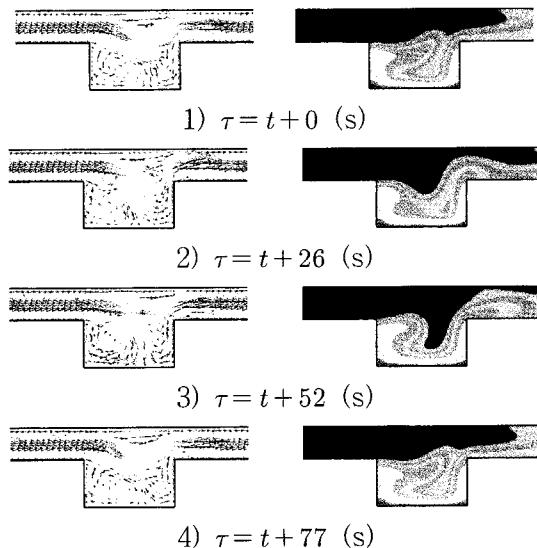


Fig. 11 Temperature patterns and velocity vectors at different instants of a flow cycle for $Ra = 6.86 \times 10^4$, $Re = 0.05$ and $AR = 0.5$

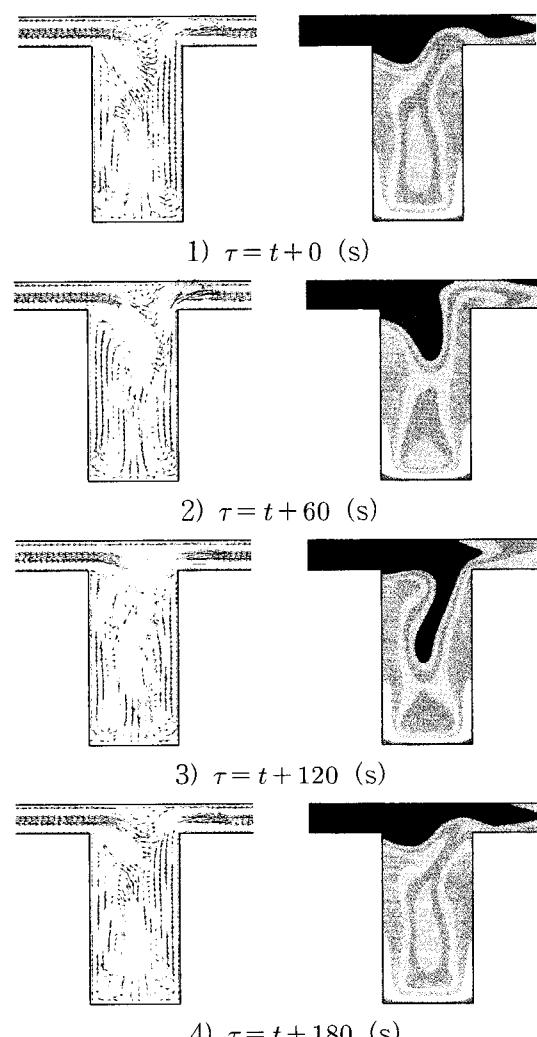


Fig. 12 Temperature patterns and velocity vectors at different instants of a flow cycle for $Ra = 6.86 \times 10^4$, $Re = 0.05$ and $AR = 2$

Table 1 The range of Re on the periodic flow for various Ra and AR

	$Ra = 3.0 \times 10^4$	$Ra = 6.86 \times 10^4$	$Ra = 1.0 \times 10^5$
$AR = 0.5$	$0.02 \leq Re \leq 0.05$	$0.01 \leq Re \leq 0.1$	$0.01 \leq Re \leq 0.2$
$AR = 1$	$0.01 \leq Re \leq 0.08$	$0.01 \leq Re \leq 0.4$	$0.01 \leq Re \leq 0.6$
$AR = 1.5$	$0.01 \leq Re \leq 0.1$	$0.01 \leq Re \leq 0.5$	$0.01 \leq Re \leq 0.8$
$AR = 2$	$0.01 \leq Re \leq 1$	$0.01 \leq Re \leq 1$	$0.01 \leq Re \leq 1$

Fig. 10은 $AR = 1$ 일 때 Re 수에 대한 한 주기 내의 가열벽의 \overline{Nu}_P 수의 분포를 여러 가지 Ra 수에 대하여 나타낸 것이다. Ra 수가 각각 $Ra = 3.0 \times 10^4$, $Ra = 6.86 \times 10^4$ 그리고 $Ra = 1.0 \times 10^5$ 일 때 \overline{Nu}_P 수의 최대치는 모두 주기적 유동범위 내에서 나타났으며 ($0 < \overline{Nu}_P < 0.6$), 매우 작은 Re 수 범위를 제외하고는 전반적으로 저 Re 수 영역에서의 주기적인 유동은 캐비티 내부의 열전달을 촉진시킬 수 있다. 또한 Ra 수가 증가함에 따라 \overline{Nu}_P 수는 증가하였다.

Fig. 11은 $Ra = 6.86 \times 10^4$, $Re = 0.05$ 그리고 $AR = 0.5$ 일 때 한 주기 내의 속도분포와 온도분포를 나타내고 있다. 속도분포를 보면, $AR = 1$ 일 때 와 마찬가지로 캐비티 내부의 좌우측에 각각 한 개의 셀을 형성하고 있으며 일정한 변화를 겪으면서 주기적인 유동을 완성하게 된다. 온도분포를 보면, $AR = 1$ 일 때 와 마찬가지로 작은 입구유속과 자연대류의 영향으로 채널 입구로부터 유입된 낮은 온도의 유체가 캐비티 내부에 침투되는 것을 볼 수 있으며, 주기는 $AR = 1$ 일 때 와 비해 감소하였다.

Fig. 12는 $Ra = 6.86 \times 10^4$, $Re = 0.05$ 그리고 $AR = 2$ 일 때 한 주기 내의 속도분포와 온도분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 채널을 통해 유입된 낮은 온도의 유체가 하부 가열벽에 의한 자연대류의 영향으로 캐비티 내부로 침투하여 셀 유동을 형성하지만, 형상비가 증가함에 따라 상호 복잡한 간섭에 의해 $AR = 0.5$ 과 $AR = 1$ 에 비해 다양한 셀 유동형태를 보이며 한 주기를 형성하였고, 그 주기는 증가하였다.

Fig. 13은 $Ra = 6.86 \times 10^4$ 그리고 $Re = 0.05$ 일 때 종횡비가 주기에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 종횡비가 증가함에 따라 주기는 증가하였다.

Table 1은 Ra 수 및 종횡비에 따른 주기적 유동이 발생하는 Re 수의 범위를 나타내고 있다. Table

1에서 보는 바와 같이 주기적 유동이 발생하는 영역은 Re 수, Ra 수 그리고 종횡비에 크게 영향을 받았으며, 주기적 유동이 발생하는 Re 수의 영역은 Ra 수 및 종횡비가 증가함에 따라 증가하였다.

4. 결 론

캐비티를 포함한 채널 내에서 Re 수 ($0 < Re \leq 1$), Ra 수 ($10^3 \leq Ra \leq 10^5$) 그리고 종횡비 ($0.5 \leq AR \leq 2$)의 변화가 고 점성유체의 비정상 혼합대류에 미치는 영향을 2차원 수치적 방법으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 캐비티 내의 주기적 유동은 저 Re 수 영역에서 나타났으며, 그 주기는 Ra 수 및 Re 수가 증가함에 따라 감소하였고, 종횡비가 증가함에 따라 증가하였다.
- 2) 열전달은 Ra 수가 증가함에 따라 증가하였고, 주기적인 유동은 전반적으로 캐비티 내부의 열전달을 촉진시켰다.
- 3) 주기적 유동이 발생하는 Re 수의 영역은 Ra 수 및 종횡비가 증가함에 따라 증가하였다.

참고 문헌

1. A. Amahmid., M. Hasnaoui and P. Vassieur, 1997, "Multiplicité des solutions en convection naturelle dans une géométrie répétitive", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, pp. 3805~3818.
2. M. Hasnaoui., E. Bilgen and P. Vasseur, 1996, "Natural convection above an Array of open cavities heated from below", Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 18, pp. 463~482.
3. W. Aung, 1983, "An Interferometric Investigation of Separated Forced Convection in Laminar Flow Past Cavities", accepted for

- publication in ASME J. Heat Transfer, Vol. 105, Aug. pp. 505~512.
4. T. J. Yong and K. Vafai, 1998, "Convective cooling of a heated obstacle in a channel", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, pp. 313 1~3148.
 5. T. J. Yong and K. Vafai, 1998, "Convection flow and heat transfer in a channel containing multiple heated obstacle", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, pp. 3279~3298.
 6. C. Herman and E. Kang, 2001, "Experimental visualisation of temperature fields and study of heat transfer enhancement in oscillatory flow in a grooved channel", Heat Mass Transfer, Vol. 37, pp. 87~99.
 7. M. E. Braaten and S.V. Patankar, 1985, "Analysis of laminar mixed convection in shrouded arrays of heated rectangular blocks", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, pp. 1699~1709.
 8. H. W. Wu and S. W. Perng, 1998, "Heat transfer augmentation of mixed convection through vertex shedding from an inclined plate in a vertical channel containing heated blocks", Num. Heat Transfer, Part A, Vol. 33, pp. 225~244.
 9. M. Hasnaoui et al., 1991, "Mixed convective heat transfer in a horizontal channel heated periodically from below", Num. Heat Transfer, Part A, Vol. 20, pp. 297~315.
 10. M. Najam, A. Amahmid, M. Hasnaoui and M. EiAlami, 2003, "Unsteady mixed convection in a horizontal channel with rectangular blocks periodically distributed on its lower well", Int. J. Heat and Fluid flow, Vol. 24, pp. 726~735.