

하나의 열원을 가지는 캐비티 내의 열전달 특성

이상철† · 이용훈* · 배강열* · 정한식** · 정효민**

(원고접수일 : 2003년 6월 12일, 심사완료일 : 2003년 11월 3일)

Heat Transfer Characteristics on the Cavity with One Heat Source

Sang-Chul Lee† · Yong-Hun Lee* · Kang-Youl Bae* · Han-Shik Chung** · Hyo-Min Jeong**

Abstract : A numerical study have been performed on a cavity with one heat source by the open ratio and tilt angle. The goal of this study is to get the information for designing a solar collector absorber, semi-conductor equipment and block heater and so on. The parameters for this study is the various open ratio, and tilt angle of the cavity and Rayleigh numbers. The finite volume method with SIMPLE computational algorithm are used and calculated the heat transfer in the cavity. As a result, the heat transfer was promoted by increase of Rayleigh numbers and open ratios. But, the heat transfer was not prompted at lower wall of cavity because the flow pattern are very small at lower space in the cavity($Or=0.1$). As the Rayleigh number is increased, the mean nusselt numbers are increased at inside wall.

Key words : Aspect ratio(종횡비), Heat source(열원), Open ratio(개방비), Tilt angle(경사각)

기호설명

Ar : 종횡비 [L/H]

H : Y 방향의 무차원 길이

L : X 방향의 무차원 길이

Nu : 국소 Nusselt 수

\overline{Nu} : 평균 Nusselt 수

Or : 개방비 [P/L]

P : 흡수기 개구부의 무차원 길이

Pr : Prandtl 수

Ra : Rayleigh 수

T : 공간 내 온도 [$^{\circ}C$]

T_c : 냉각온도 [$^{\circ}C$]

T_h : 가열온도 [$^{\circ}C$]

U : X 방향의 속도

V : Y 방향의 속도

X : 수평방향 좌표

Y : 수직방향 좌표

† 책임저자(경상대학교 대학원 정밀기계공학과), E-mail : challee1@netian.com, T : 055)646-4766

* 경상대학교 대학원 정밀기계공학과, E-mail : challee1@netian.com

** 경상대학교 기계항공공학부 · 해양 산업연구소, E-mail : hschung@nongae.gsnu.ac.kr

그리스 문자

- α : 열 확산계수 [m^2/s]
- β : 열팽창계수 [K^{-1}]
- μ : 점성계수 [$Pa \cdot S$]
- ν : 동점성계수 [m^2/s]
- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- Φ : 무차원 온도
- θ : 캐비티의 경사각도 [$^\circ$]

1. 서 론

인간의 삶의 질이 높아짐에 따라 쾌적한 환경에서 생활하기를 원하고 이에 따른 공조기술의 요구도 날로 어려워지고 있다. 이러한 공조기술에서 열이나 유체의 유동에 관한 정확한 정보는 대단히 중요하다. 일반 건축물에 대한 공조설비의 정확한 계산을 위하여 수많은 연구가 이루어지고 있다.^{[1]-[2]} 즉 밀폐공간에서의 가열원에 관한 설계^[3]를 통하여 최적의 난방 환경에 대한 연구 등이 있다. 또한, 사각공간의 유체유동 및 열전달에 관한 연구는 청정 실내의 환기 및 오염문제, 태양열 집열판 설계, 전자장비의 냉각문제 등에 관계되어져 많은 연구결과들이 보고되고 있다. 따라서 사각공간내의 유동은 이들 연구와 밀접한 관계가 있으며 기초적인 연구 대상으로서 캐비티내의 열유동^[4]을 많이 취급하고 있다. 이러한 밀폐 사각공간내의 연구는 전자회로기판의 냉각문제^[5]나 빙축열 시스템에서도 활용되고 있다^[6].

본 연구는 캐비티 내에 열원이 존재한다고 가정하고 유체 및 열의 이동이 가능한 개구부를 두어 개구부의 크기와 경사각을 달리함으로써 캐비티내의 열전달 특성을 연구하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 계산모델

계산모델의 기하학적 형상은 Fig. 1과 같이 캐

비티 내부의 중앙부에 고온(T_h)의 열원이 존재하며 열원의 크기는 $D/H=0.08$ 로 두었다. 또한, 개구부(P)는 대기에 개방되고 개구부를 제외한 모든 벽면은 저온(T_c)으로 유지된다고 가정하였다. 캐비티의 종횡비(Ar)는 $L/H=0.64$ 로 하였으며 개방비(Or)를 P/L 로 두어 층류 자연대류를 가정한 무차원 방정식 해를 구하기 위한 유한 체적법을 적용하였다.

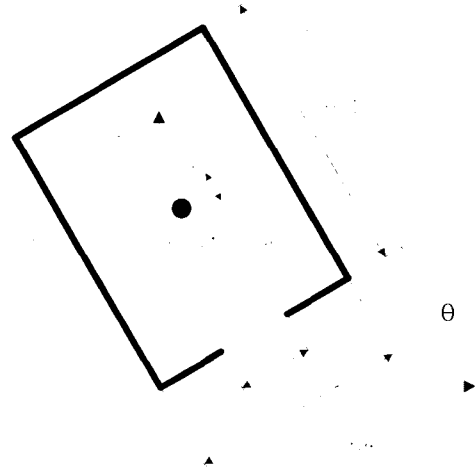


Fig. 1 Schematic diagram of numerical model for cavity with one heat source

2.2 지배 방정식

직교 좌표계에 대한 유동을 지배하는 방정식은 연속, 운동량, 그리고 에너지 방정식으로서 이들의 2차원의 층류에 대한 무차원 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \tag{1}$$

운동량방정식 :

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \nabla^2 U + \frac{Ra}{Pr} \Phi \sin \theta \tag{2}$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \nabla^2 V + \frac{Ra}{Pr} \phi \cos \theta \quad (3)$$

에너지 방정식 :

$$U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y} = \frac{1}{Pr} \nabla^2 \phi \quad (4)$$

여기서 사용한 무차원 수는 다음과 같다.

$$\phi = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad (5)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (6)$$

$$Ra = \frac{\rho g \beta (T_h - T_c) H^3}{\mu \alpha} \quad (7)$$

캐비티 내의 열 유체유동에 대한 특성을 위한 경계조건은 다음과 같다.

· 열원

$$U = V = 0, \phi = 1 \quad (8)$$

· 하부벽면의 개구부

$$U = 0, \frac{\partial V}{\partial Y} = 0, \frac{\partial \phi}{\partial Y} = 0 \quad (9)$$

· 개구부를 제외한 모든 벽면

$$U = V = 0, \phi = 0 \quad (10)$$

2.2 수치해석

유동장과 온도장을 해석하기 위하여 계산영역을 X축의 방향의 길이를 L=0.64로 Y축 방향의 길이를 H=1로써 격자간의 길이는 등간격이고 직교 좌표계를 사용하여 수치해석을 실행하였다. 캐비티 내의 열원과 저온벽면에 대하여 $10^1 \leq Ra \leq 10^3$ 일때에 관하여 개방비 Or=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0과 수평면과의 경사각이 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 인 경우의 열 및 유체의 유동에 대한 온도장과 속도장을 해석하고 이에따른 캐비티 벽면의 무차원길이에 대한 국소 Nusselt수 및 평균 Nusselt수를 구하였다.

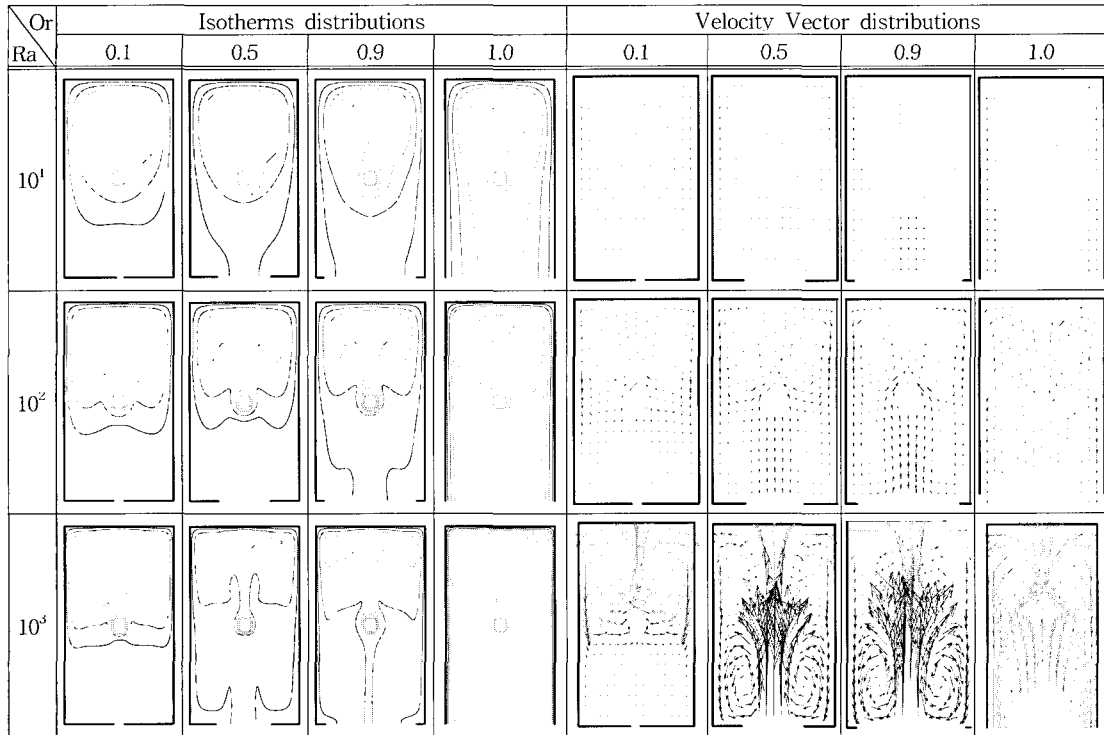


Fig. 2 Isotherms and Velocity vector distributions in a cavity for various Ra and open ratios at $\theta=0^\circ$

3. 수치해석 결과 및 고찰

Fig. 2는 경사각 $\theta=0^\circ$ 일 때 각 개방비와 Ra에 따른 캐비티 내의 등온선분포와 속도벡터분포를 나타낸 것이다. Ra의 증가에 따라 등온선들이 캐비티 내의 벽면쪽으로 밀집되어 벽면과의 열전달이 촉진됨을 알 수 있고, 특히 $\theta=0^\circ$ 일 때 상부벽면쪽의 등온선이 가장 밀집되어 있는 것은 Ra가 증가함에 따라 대류향이 커짐으로 밀도차에 의해 유체가 상부벽면쪽으로 이동하기 때문이다. 또한 개방비의 증가에 의해서도 열전달 촉진현상을 보였다. 속도벡터의 분포는 온도장에서 알 수 있듯이 Ra의 증가와 개방비의 증가에 따라 속도벡터의 크기는 증가하였다. 개방비 Or=1.0에서는 캐비티 캐비티의 하부벽면이 없으므로 캐비티 상부의 좌우측에서 순회유동이 일어나고 Or=0.5와 0.9에서는 캐비티의 하부벽면에 의해 하부에서 상대적으로 큰 순회유동이 발생하였다. 개방비 Or=0.1에서는 개구부가 아주 작기 때문에 캐비티 밀폐공간에서의 유체의 유동과 유사하게 하부에서는 정체현상이 상부에서는 순회유동이 발생하였다.

Fig. 3은 $Ra=10^2$, Or=0.5일 때 경사각에 따른 캐비티 내의 등온선분포와 속도벡터분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 $\theta=0^\circ$ 일 때

는 상부벽면으로 열전달이 이루어지며 경사각의 증가에 의해 열전달 방향이 상부벽면에서 우측벽면으로 점점 전환되었다.

Fig. 4는 경사각 $\theta=0^\circ$ 일 때 Ra와 개방비에 따른 캐비티내의 수평중앙단면에서의 무차원 온도분포를 나타낸 것이다. Ra가 증가함에 따라 열전달이 촉진되어 좌우벽면 근방에서의 온도가 차츰 증가함을 보이고 있다. 이것은 Fig. 2의 등온선분포에서 나타난 것과 같이 Ra의 증가에 의해 캐비티 내의 등온선이 각 벽면으로 밀집되어 벽면 가까이 열전달이 촉진되어진 결과이다. 개방비에 따른 온도분포를 보면 Or=0.1을 제외한 Or=0.5, 0.9, 1.0에서는 개방비의 증가에 따라 온도분포도 증가하는 경향을 보였지만 Or=0.1인 경우의 온도는 Or=1.0일 때 보다는 낮고 Or=0.5와 0.9일 때 보다는 높게 나타났다. 그 이유는 Fig. 2에서 설명한 바와 같이 캐비티의 상부공간의 좌우측에서 순회유동이 일어나고, 하부벽면에서는 정체현상이 일어나 캐비티의 수평중앙단면을 경계로 유체가 상부에서만 순환하기 때문에 수평중앙단면에서의 온도가 높게 나타난 것이다. 또한 Or=1.0이 수평중앙단면에서 가장 높은 온도를 나타내는 것은 하부의 벽면이 존재하지 않아 캐비티 내·외부의 유체교환이 활발히 이루어져 열이 전체적으로 고르게 분포되기 때문이다.

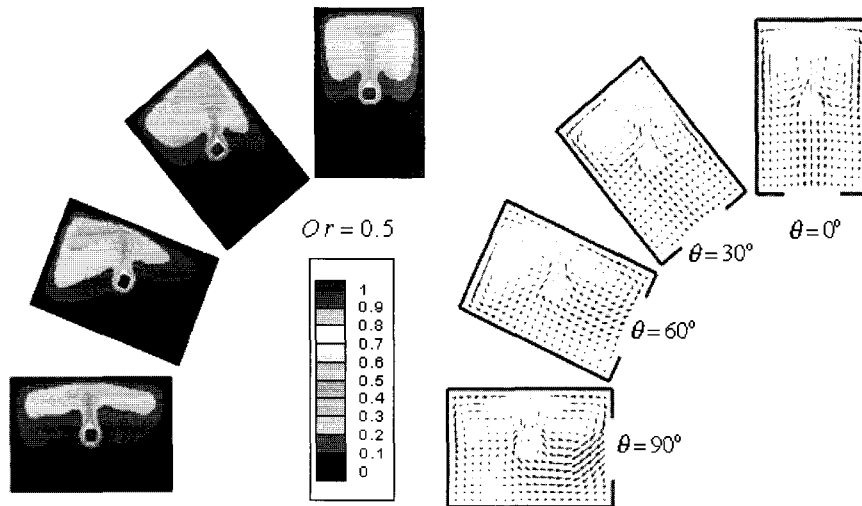


Fig. 3 The distributions of isotherms and velocity vectors by tilt angles at Or=0.5, Ra=102

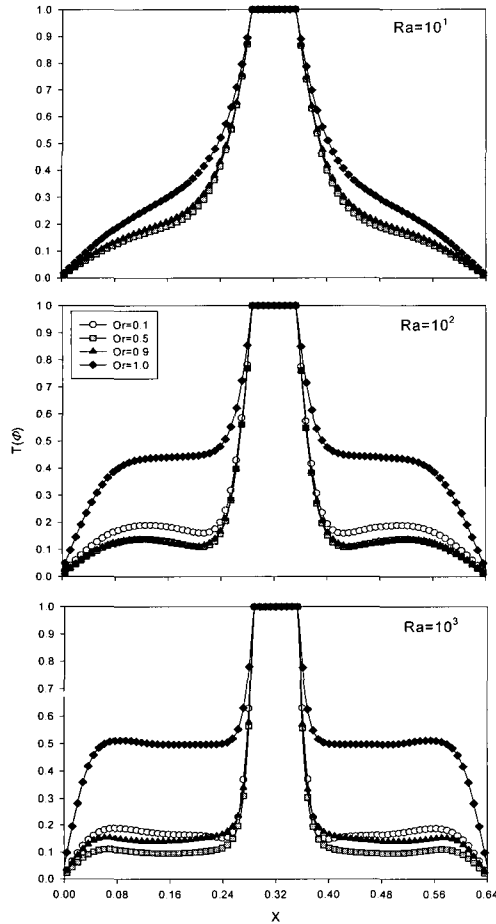


Fig. 4 Dimensionless temperature distributions on horizontal center section for various Ra and open ratios at $\theta=0^\circ$, $Y=0.5$

Fig. 5는 경사각 $\theta=0^\circ$ 일 때 Ra와 개방비에 따른 캐비티의 수평중앙단면의 속도분포를 나타낸 것이다. 속도분포는 Fig. 4에서 나타낸 온도분포와 같이 좌우가 대칭적인 분포가 나타났으며, Ra의 증가에 의해 속도벡터의 크기가 증가하였다. 특히 $Ra=10^2$ 일 때 캐비티 하부에 벽면이 있는 $Or=0.1, 0.5, 0.9$ 에서는 비슷한 속도분포가 나타나고 $Or=1.0$ 일 때 열원근방 음의 속도와 좌우 벽면근방 양의 속도가 가장 크게 나타나는데 이것은 하부벽면이 없으므로 캐비티 내 하부공간에서 선회유동이 일어나지 않기 때문에 수평중앙단면의 속도벡터가 크게 나타난 것이다. 하지만 $Ra=10^3$ 일 때 각 개방비에 따른 속도분포를 보면 $Ra=10^2$

일 때와는 많은 차이를 보이고 있다. 이 그래프에 나타나듯이 캐비티 내 벽면의 좌우근방에서 $Or=0.1$ 일 때 속도벡터 크기가 두번째로 크게 나타난 것은 Fig. 2의 속도벡터의 상부에서 나타낸 바와같이 캐비티 내의 상부 좌우측에서의 선회유동이 $Or=0.5$ 와 0.9 보다 촉진된 결과이다. 그리고 열원의 좌우근방에서 $Or=0.5$ 와 0.9 의 속도벡터의 크기가 $Or=1.0$ 보다 크게 나타난 것은 캐비티 하부벽면에 의해 선회되는 속도벡터와 외부로부터 유입되는 속도벡터가 합해져서 상대적으로 $Or=1.0$ 일 때보다 높은 속도가 나타난 것이다.

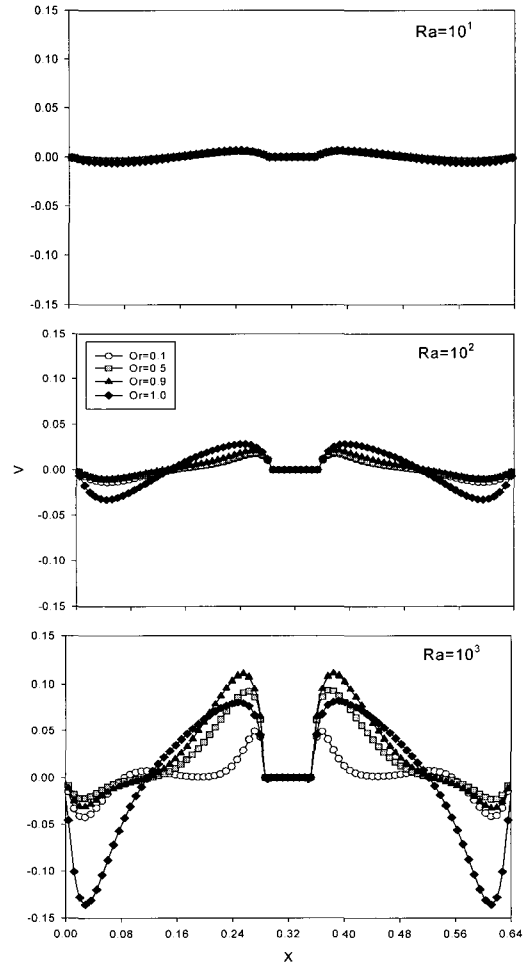


Fig. 5 Velocity distributions on horizontal center section for various Ra and open ratios at $\theta=0^\circ$, $Y=0.5$

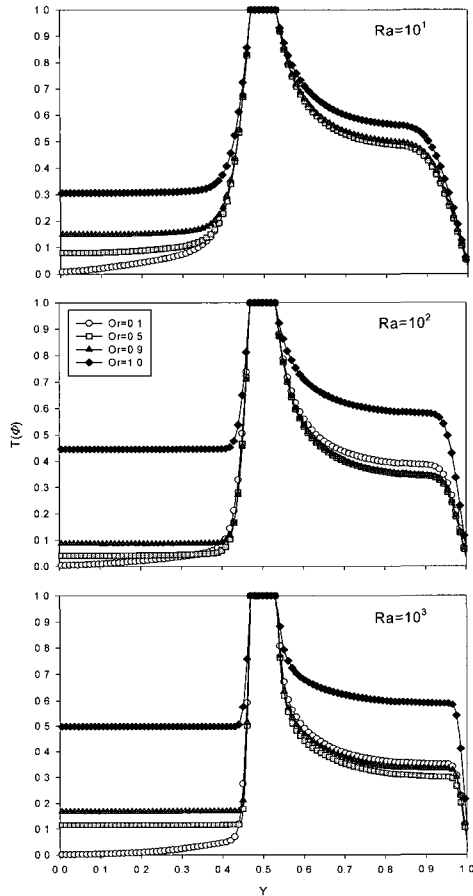


Fig. 6 Dimensionless temperature distributions on vertical center section for various Ra and open ratios at $\theta=0^\circ$, $X=0.32$

Fig. 6은 캐비티의 수직중앙단면에서의 Ra와 개방비에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. Ra가 증가함에 따라 열원의 하부에서는 개방비가 증가할수록 상대적으로 높은 온도분포를 보여주고 있으나 상부에서는 Or=1.0을 제외하고 유사한 온도분포를 보여주고 있다. 이는 개방비가 상부보다는 하부에 큰 영향을 주는 결과이다.

Fig. 7은 캐비티의 수직중앙단면의 Ra와 개방비에 따른 속도분포를 나타낸 것이다. Ra가 증가함에 따라 대류향이 커지므로 캐비티 수직중앙단면의 속도도 함께 증가하였다. Ra=10²일 때 캐비티 하부의 수직중앙단면에서는 개방비의 증가에 의해 속도의 크기가 함께 변화하고 상부에서는 유

사한 속도분포를 보였지만 Ra=10³일때는 Or=1.0의 속도가 Or=0.5와 0.9보다도 작게 나타났다. 이것은 Fig. 5에서 설명한바와 같이 Or=0.5와 0.9일때는 캐비티 하부의 좌우공간에서 선회유동이 강하게 나타나기 때문에 Or=1.0의 속도가 상대적으로 작게 나타난 것이다.

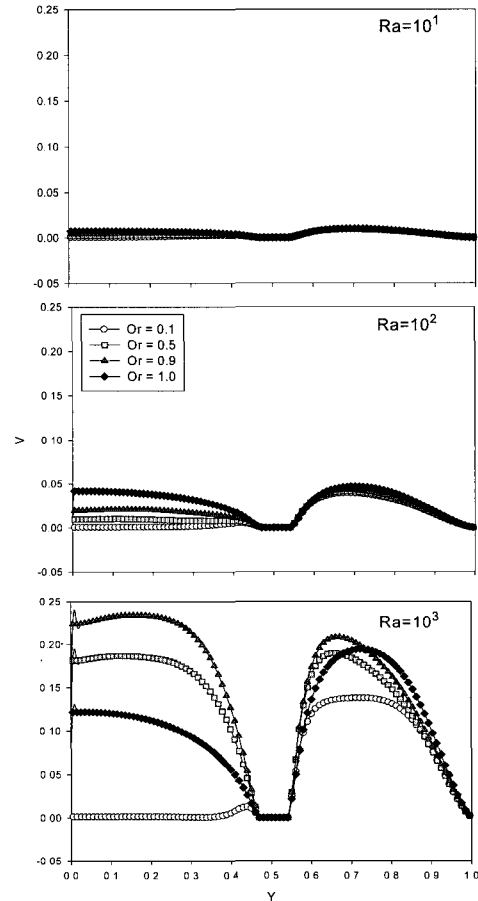


Fig. 7 Velocity distributions on vertical center section for various Ra and open ratios at $\theta=0^\circ$, $X=0.32$

Fig. 8은 경사각 $\theta=0^\circ$ 에서의 Ra와 개방비에 따른 캐비티 내 각 벽면의 국소 Nusselt수를 나타낸 것으로서 각 그래프의 종축은 국소 Nusselt수를 나타내었고, 횡축은 캐비티 벽면의 무차원길이를 나타낸 것이다. 각 개방비에서 Ra의 증가에 따라 캐비티 내의 국소 Nusselt수가 증

가하였다. 또한 상부벽면이 좌우벽면에 비하여 높은 국소 Nusselt수를 나타냄으로 $\theta = 0^\circ$ 일때는 상부벽면으로 열전달이 활발히 촉진됨을 알 수 있다. 하지만 각 개방비에 따른 국소 Nusselt수를 비교해보면 $Or=0.1$ 일때가 $Or=0.5$ 일때보다 상부벽면과 상부공간의 좌우벽면에서 더 높은 국소 Nusselt수가 나타났다. 이것은 Fig. 6의 캐비티 상부 수직중앙단면의 온도분포에서 이미 확인했다시피 상부에서의 온도가 높게나온 결과 그만큼 열전달이 활발히 촉진된다는 것으로서 증명된다.

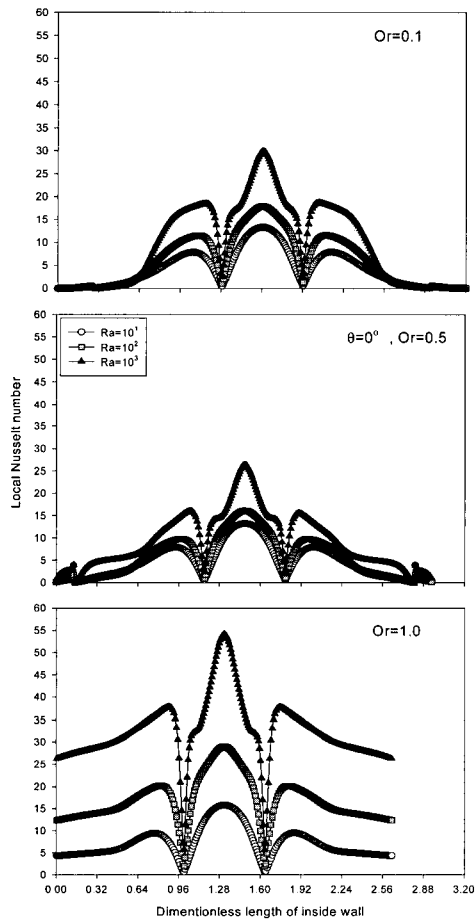


Fig. 8 Local Nusselt number distributions of inside wall by various open ratio, $\theta = 0^\circ$

Fig. 9는 $Or=0.5$ 일 때 Ra 와 경사각(θ)에 따른 캐비티 내의 무차원 길이에 대한 국소 Nusselt수를 나타낸 것이다. 캐비티의 경사각의

변화는 캐비티 내의 열전달 방향의 변화를 가져왔다. Fig. 3에서 $Or=0.5$ 의 경사각도에 따른 등온선분포와 속도벡터분포를 보면 경사각이 증가함에 따라 차츰 열전달 방향이 상부벽면에서 우측벽면으로 전환되고 있음을 확인할 수 있다. 그러므로 경사각이 증가함에따 캐비티 내 각벽면에서의 국소 Nusselt수는 $\theta = 0^\circ$ 일때는 상부벽면에서 최대 국소 Nusselt수를 나타내고, $\theta = 90^\circ$ 일때는 우측벽면에서 최대 국소 Nusselt수가 나타났다. 그리고 $\theta = 90^\circ$ 일때의 우측벽면에서의 최대 국소 Nusselt수가 $\theta = 0^\circ$ 일때의 상부벽면에서의 최대 국소 Nusselt수 보다 높은 값을 가지는 이유는 캐비티의 열원으로부터 벽면까지의 거리가 상부벽면 보다는 우측벽면이 더 가깝기 때문이다.

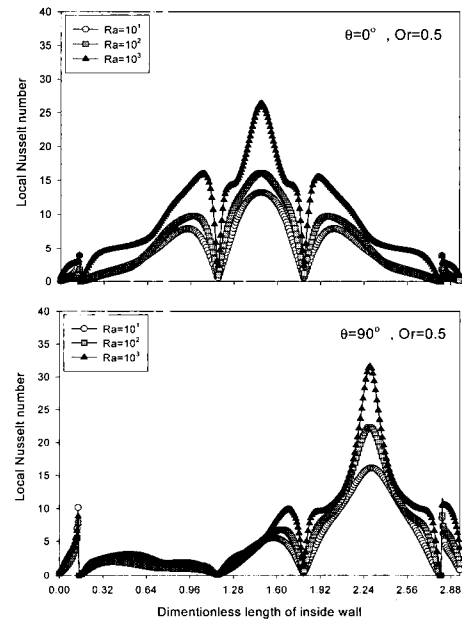


Fig. 9 Local Nusselt number distributions of inside wall by various tilt angles, $Or=0.5$

Fig. 10은 Rayleigh수, Or 및 θ 의 변화에 따른 캐비티 내의 평균 Nusselt수를 나타낸 그래프이다. $Or \leq 0.9$ 에서는 Ra 와 θ 의 증가함에 따라 평균 Nusselt수의 큰 차이를 보이지 않지만 $Or=1.0$ 에서는 급격하게 증가하여 $\theta = 0^\circ$ 이고 $Or=1.0$ 일 때 가장 높은 평균 Nusselt수가 나타

났다. 이는 완전 개방으로 인하여 캐비티 내의 유체와 외부유체의 열교환이 활발하게 이루어져 캐비티 내의 벽면가까이 열전달이 가장 활발히 촉진된 결과이다. 또한 개방비가 $Or=1.0$ 에서는 θ 의 증가에 따라 평균 Nusselt 수의 변화는 감소하는 경향을 보였으며, $Or \leq 1.0$ 에서는 불규칙적으로 변화하였다. 이것은 $Or \leq 1.0$ 인 경우 Or , Ra 및 θ 의 영향에 의해 캐비티 내 유체의 유동패턴이 조금씩 상이하게 나타나기 때문이다.

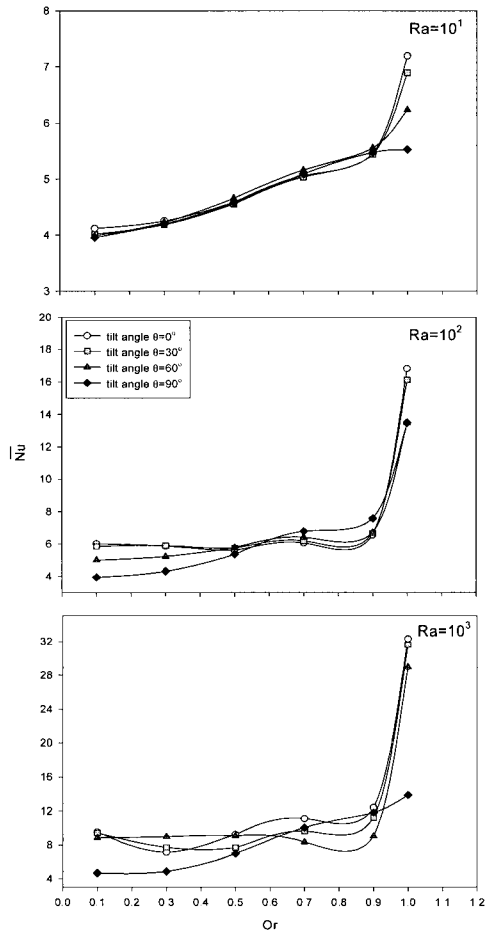


Fig. 10 Mean Nusselt number of a cavity inside wall by various Rayleigh number

4. 결 론

캐비티 내에서 열원이 존재할 경우, 자연대류 열

전달에 관한 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) $\theta = 0^\circ$ 에서 Ra 와 Or 의 증가에 따라 캐비티내의 등온선은 벽면으로 밀집되어 열전달이 활발히 촉진되고 경사각(θ)의 증가에 의해 열전달 방향이 상부벽면에서 우측벽면으로 전환됨을 알수 있었다.

(2) $\theta = 0^\circ$ 일 때 $Or=0.1$ 인 캐비티 내의 속도 분포에서 상부의 좌우공간에서 선회유동이 발생하고 하부에서는 정체현상이 발생하였으며, $Or=0.5$ 와 0.9 에서는 캐비티 하부의 좌우공간에서 강한 선회유동이 발생하였다.

(3) Ra 가 증가할수록 캐비티내의 벽면가까이 열전달이 촉진되므로 캐비티내 수평중앙단면에서 좌우 벽면근방의 온도와 속도분포가 증가하며, $Or=0.1$ 인 캐비티내 상부의 선회유동때문에 온도 분포가 $Or=0.5$ 와 0.9 보다 높게 나타났다. 또한 $Ra=10^3$ 에서는 $Or=0.5$ 와 0.9 인 캐비티내 하부의 좌우공간에서 강한 선회유동의 영향에 의해 $Or=0.5$ 와 0.9 가 $Or=1.0$ 보다 열원근방에서 높은 속도를 나타냈다.

(4) 수직중앙단면에서 Ra 가 증가함에 따라 하부에서는 개방비가 증가할수록 상대적으로 높은 온도분포를 보여주며, 개방비는 하부에 큰 영향을 주고 있었다.

(5) 국소 Nusselt 수는 Ra 와 개방비가 증가함에 따라 증가하며, $Or=0.1$, $\theta = 0$ 일 때의 상부벽면에서의 국소 Nusselt 수는 캐비티 상부의 선회유동에 의해 열전달이 촉진되어 $Or=0.5$ 와 0.9 보다 더 높은 국소 Nusselt 수를 나타냈다. 또한 경사각 $\theta = 90^\circ$ 일 때 우측벽면에서 최대 국소 Nusselt 수를 나타냈으며 이때의 열원과 벽면과의 거리가 가깝기 때문에 $\theta = 0^\circ$ 일 때보다 더 높은 최대 국소 Nusselt 수를 나타냈다.

(6) $Or \leq 0.9$ 에서는 Ra 와 θ 의 증가함에 따라 평균 Nusselt 수의 큰 차이를 보이지 않지만 $Or=1.0$ 인 캐비티내에서는 경사각이 감소할수록 평균 Nusselt 수는 증가하여 $\theta = 0^\circ$ 이고 $Or=1.0$ 일 때 가장 높은 평균 Nusselt 수가 나타나 열전달이 가장 활발히 촉진됨을 알수 있었다.

후 기

본 연구는 해양수산 개발원 지원의 수산 특성파 제(No.09980004) 연구비와 경상대학교 BK21 지역대학육성사업단 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Jon Klote, "Full Scale Smoke Control Tests at the Plaza Hotel Building", ASHRAE Journal April, pp.28-32, 1989.
- [2] Kenneth M. Elovitz and David M Elovitz, "Understanding Smoke Management and Control", ASHRAE Journal April, pp.34-37, 1993
- [3] Francois Penot and Milos Pavlovic, "Heat transfer analysis of Mixed Convection in a Heated Cavity", Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference Vol. 3, San Francisco, USA, pp. 1419-1424, 1986.
- [4] Toru Fusegi, "Numerical Study of Mixed Convection in a Channel with Periodic Cavities", Proceedings of the 10th International Heat Transfer Conference Vol. 5, Brighton UK, pp.471-476, 1994.
- [5] W. Shyy and M. M. Rao, "Simulation of Transient Natural Convection Around an Enclosed Vertical Channel", Journal of Heat Transfer, The ASME, Vol. 115, pp.946-954., 1993.
- [6] K. Sasaguchi, K. Kusano and R. Viskanta, "A Numerical Analysis of Solid-Liquid Phase Change Heat Transfer Around a Single and Two Horizontal, Vertically Spaced Cylinders in a Rectangular Cavity", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 6, pp.1343-1354, 1997.

저 자 소 개

**이상철 (李相徹)**

1977년 3월생, 2003년 경상대학교 정밀기계공학과 졸업, 2003년-현재 경상대학교 정밀기계 대학원 석사과정.

**이용훈 (李庸煥)**

년 월생, 2001년 경상대학교 선박기계공학과 졸업, 2003년 경상대학교 정밀기계공학과 대학원 석사과정 졸업, 2003년-현재 경상대학교 정밀기계공학과 대학원 박사과정.

**배강열 (裵康烈)**

1972년 9월생, 1999년 경상대학교 선박기계공학과 졸업, 2003년 경상대학교대학원 기계공학과 박사과정 수료, 해양산업연구소 특별연구원.

**정한식 (鄭漢植)**

1954년 4월생, 1981년 동아대학교 기계공학과 졸업, 1987년 동 대학원 기계공학과 박사학위, 1981년-1985년 대림자동차공업(주) 기술부, 1988년-1991년 창원기능대학 열설비학과, 1995년-2003년 현 경상대학교 기계항공공학부 부교수.

**정효민 (鄭孝玟)**

1958년 9월생, 1978년-1982년 부경대학교 공학사, 1984년-1987년 부경대학교 공학석사, 1988년-1992년 Univ. of Tokyo, Japan 공학 박사, 1995년-1999년 경상대학교 조교수, 1999년-2000년 Univ. of Central Florida (Florida Solar Energy Center), Visiting Professor, 1999년 10월-현재 경상대학교 기계항공공학부 부교수.