

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 21, No. 3, 2001

경사각도 변화에 따른 태양열 집광흡수기내의 열 유체 유동에 관한 수치해석

이용훈*, 배철환*, 배강열*, 정효민**, 정한식**

* 경상대학교 대학원

** 경상대학교 수송기계공학부 · 해양산업연구소

A Numeical Analysis on the Thermal and Fluid Flow in Solar Concentration Absorber with Tilt Angle

Y. H. Lee^{*}, C. H. Bae^{*}, K. Y. Bae^{*}, H. M. Jeong^{**} and H. S. Chung^{**}

* Graduate School, GyeongSnag National Uinversity

** School of Transport Vehicle Engineering, Gyeongsang National University

Abstract

This paper showed the a numerical analysis of the thermal and fluid flow in solar concentration absorber with tilt angle, and the purpose of this study is to obtain the optimum tilt angle of the absorber. The boundary conditions of a numerical model were assumed as flows : (1) The heat source is located at the center of absorber. (2) The bottom wall is opened and adiabatic. (3) The top, right and left walls are cooled wall. The parameters for the numerical analysis are tilt angles and Rayleigh numbers i.e., tilt angle $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ and $101 \leq Ra \leq 103$. The velocity vectors and isotherms were dense at wall side and the heat source. The mean Nusselt number had a maximum value at $\theta = 0^\circ$ and showed a low value as the tilt angles were increased. Finally, the decrease rate of mean Nusselt number was appeared small with tilt angle when Rayleigh numbers were increased.

기 호 설 명

- A : 표면적[m^2]
- H : Y방향의 무차원 길이
- L : X 방향의 무차원 길이
- T : 공간 내 온도[° C]
- T_c : 냉각온도[° C]
- T_h : 가열온도[° C]
- U : X방향 속도
- V : Y방향 속도
- X : 수직방향 좌표
- Y : 수평방향 좌표
- α : 열 확산계수[m^2/s]
- β : 열팽창계수[K^{-1}]
- ρ : 밀도[kg/m^3]
- ν : 동점성계수[m^2/s]
- μ : 점성계수[$Pa \cdot s$]
- Gr : *Grashof* 수
- Nu : 국소 *Nusselt* 수
- \bar{Nu} : 평균 *Nusselt* 수
- Pr : *Prandtl* 수
- Ra : *Rayleigh* 수
- θ : 흡수기 경사각도[°]
- Φ : 무차원 온도

1. 서 론

우리나라에서는 2000년도의 경우 약 300억불의 막대한 에너지를 대부분 외국에서 수입하는 에너지 빈국으로 에너지 사용의 효율 증대와 무공해 청정 에너지의 개발이 시급히 요구된다. 이에 대하여 정부에서는 2006년까지 총 에너지 수요의

2%를 태양에너지 등의 청정 대체 에너지로 충당하려는 목표를 세우고 있다. 태양으로부터 지구 대기권 밖에 도달하는 에너지는 약 $1370(W/m^2)$ 으로 추정되고 있으며 지표면에는 대기중의 먼지나 구름 등에 의하여 산란 방사되며 지역과 시간에 따라서 값 차이를 갖고 있으며 우리나라 남부 지방에는 최고 $7000(kcal/m^2day)$ 으로 평가되고 있다. 국내외를 막론하고 가장 일반적인 태양열의 집열기는 평판형으로서 집열 온도가 $80^\circ C$ 이하의 저온이며 평판형의 집열기의 설치 면적이 크게 되는 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 저밀도의 태양열을 고밀도화 시키기 위한 집열기의 활용이 두드러지고 있다. 예로서는 PTC(Parabolic Trough Concentrator) 집열기가 대표적이다^{1)~4)}. 이 집열기는 $80\sim 200^\circ C$ 의 중온을 얻을 수 있는 시스템이지만 동서 또는 남북 방향으로 일정한 길이를 갖고 있으므로 인하여 설치 면적이 커진다. 이에 대하여 접시형 집광기를 채택 하므로써 보다 고온의 시스템으로 접근이 가능하다. 이 접시형 집광 시스템은 태양광을 반사하는 반사기(Reflector)와 이 반사된 태양광을 집적하는 흡수기(Absorber)로 구성된다. 이 흡수기는 원추형, 사각형 및 원통형 등으로서 형상에 따른 여러 종류가 채택되고 있다. 이 흡수기 내면에는 가는 열교환용 파이프를 부착하여 고온을 흡수하는 구조로 되어 이에 대한 열 교환에 관한 연구⁵⁾가 있다. 흡수기는 완전 밀폐공간과 유사한 열 유동 현상으로서 이⁶⁾와 문^{7), 8)}등은 벽면의 온도차가 밀폐공간에 미치는 영향을 연구하였고, 정⁹⁾은 밀폐공간내의 자연대류에 관한 수치해석 모델을 제시하였다. 특히 흡수기의 구조는 한 면이 대기에 개방되어 있어 기존의 완전 밀폐공간내의 유동과는 차별성이 예상된다. 그리고 흡수기의 효율을 높이기 위하여 일반적으로 태양 추적 장치를 갖고 있으며 태양의 고도와 위치에 따라서 흡수기의 집광 형태가 달라진다. 따라서 본 연구에서는 흡수기가 수평면에 대하여 일정 각도를 가진 경우에

관한 열 및 유체의 유동현상을 파악하여 보다 고효율의 고집광 시스템을 구축하기 위한 기초 자료를 마련하고자 한다.

2. 이론 해석 및 실험

2.1 이론 해석

2.1.1 계산모델

채택한 계산 모델의 기하학적 형상은 그림 1과 같이 직사각형 내부에는 반사광에 의해 형성된 열원이 있으며 하부는 대기에 개방되고 상부 및 좌.우의 벽면은 등온조건이다. 아래의 벽면은 단열로 하여 일정하게 유지되어 있다. 흡수기 모델의 크기는 1 : 0.64로 하였으며 무차원 층류대류의 방정식의 해를 구하기 위하여 직교좌표계를 적용하였다.

2.1.2 지배방정식

직교 좌표계에 대한 유동을 지배하는 방정식은 연속, 운동량, 그리고 에너지 방정식으로 이들의 무차원화된 형태는 다음과 같다.

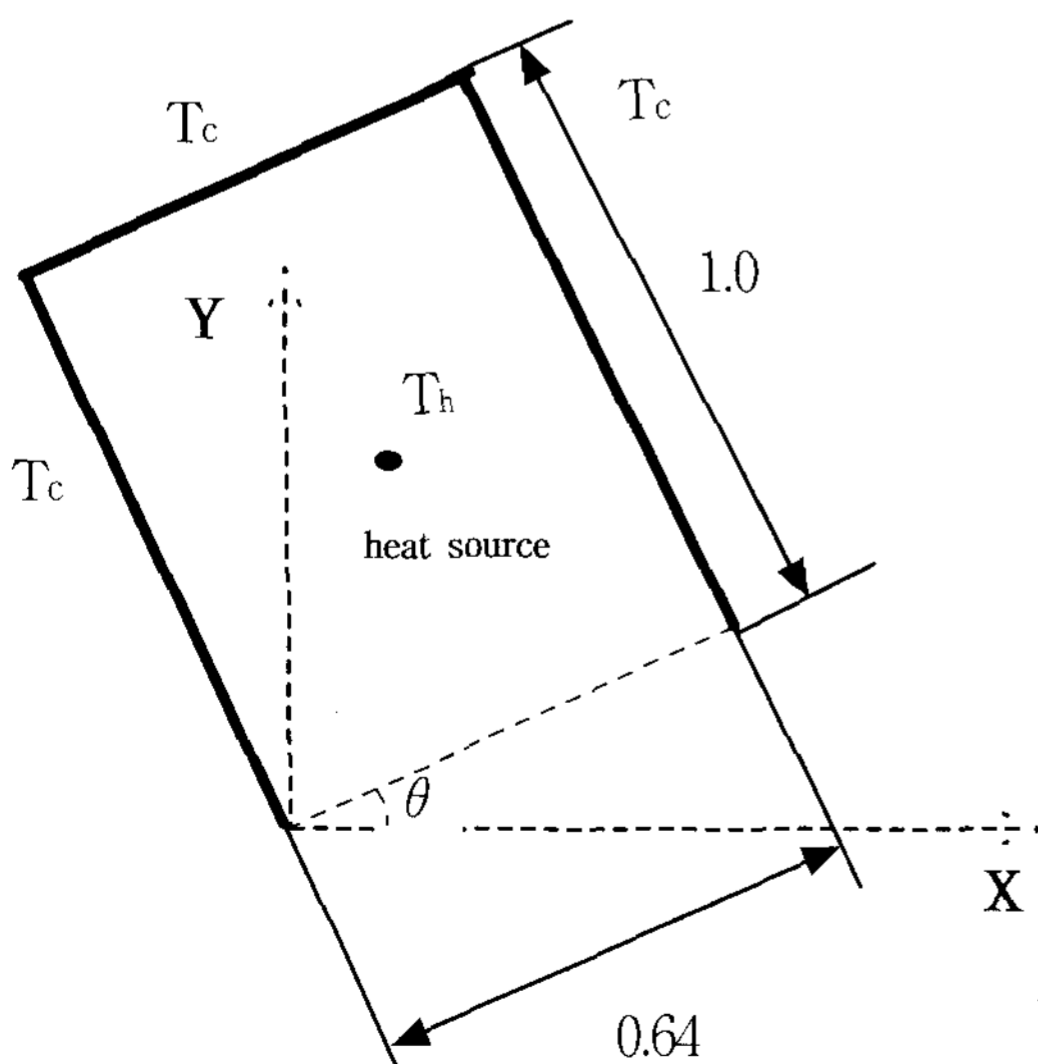


Fig. 1. Schematic diagram of numerical model.

연속방정식 :

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식 :

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

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

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.

$$\Phi = \frac{T - T_c}{T_h - T_c},$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_h - T_c)H^3}{\nu^2}, \quad Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

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

흡수기내의 열 유체유동에 대한 특성을 수치적으로 해석하기 위해서 도입한 가정은 다음과 같다.

- 정상상태 층류 유동이다.
- 양쪽의 두 벽면과 위의 벽면은 등온이고 아래 벽면은 대기와 접촉하고 있다.

- 물성치는 일정하게 유지된다.
- 계산을 위한 경계조건은 다음과 같다.
- 상부 및 좌우벽면

$$U = V = 0, \Phi = 0 \quad (5)$$

- 하부벽면

$$U = 0, \frac{\partial V}{\partial Y} = 0, \frac{\partial \Phi}{\partial Y} = 0 \quad (6)$$

- 열원

$$U = V = 0, \Phi = 1 \quad (7)$$

2.1.3 수치해석

유동장과 온도장을 해석하기 위하여 계산영역을 X축의 방향의 길이를 $L=0.64$, Y축 방향의 길이를 $H=1$ 로써 격자간의 길이는 등간격 이고 직교좌표계를 사용하여 수치해석을 실행하였다. 양쪽 면이 각각 등온 되므로, 하부가 개방된 직사각형의 흡수기 내의 열원에 대해 Rayleigh 수를 $10 \sim 10^3$ 까지 변화 시키면서 수평면과의 경사각도가 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 인 경우의 열 유체 유동에 대한 온도분포와 속도분포 대해서 해석하였다. 그리고 경사각도의 변화에 대한 평균 Nusselt 수를 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 $Ra = 10$ 일 때의 등온선 분포를 나타낸 것이다. 경사각이 0° 일 때는 등온선이 상부 및 좌우 벽면으로 균일하게 분포되고 있으나, 경사각이 커질수록 벽면 쪽에서 균일하지 않고 우측벽면 쪽으로 밀집되는 것을 볼 수 있다. 경사

각이 0° 일 경우에는 흡수기 내의 유체가 가열하게 되어 부력에 의해서 상부 벽면으로부터 개방된 하부 벽면 쪽으로 대류를 일으키게 되지만 경사각이 90° 인 경우에는 우측 벽면에서 상하 벽면 쪽으로 유체가 대류를 일으키게 되므로 개방된 하부공간으로 열의 손실이 많이 발생하여 경사각도 0° 일 때보다는 상대적으로 열 전달이 둔화된 결과이다.

그림 3은 $Ra = 10$ 일 때의 속도벡터를 나타낸 것이다. 등온선 분포와 마찬가지로 경사각이 0° 일 경우가 90° 일 경우보다 흡수기 내의 전 영역에는 고르게 발달되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것으로부터 경사각이 0° 일 경우가 90° 의 경우보다 흡수기 내로 열 전달이 더욱더 촉진되는 것을 알 수 있다.

그림 4는 $Ra = 10^2$ 일 경우의 등온선 분포이다. 전체적인 양상은 $Ra = 10$ 일 경우와 비슷하지만 Rayleigh 수가 증가함에 따라 등온선이 흡수기 내의 벽면 쪽으로 더욱 밀집됨을 알 수 있다. 이것은 온도 차이가 크게 발생됨으로 인하여 부력차가 크게되고 이로 인하여 열 전달이 촉진된 결과이다. 그림 2에서와 마찬가지로 경사각이 0° 일 때가 90° 일 때보다 흡수기 내로 열 전달이 잘 일어나고 있음을 볼 수 있다.

그림 5는 $Ra = 10^2$ 일 때의 속도 벡터를 나타내었으며 $Ra = 10$ 일 때보다는 상부 및 좌우 벽면 쪽으로 밀집되어 있음을 볼 수 있다.

그림 6과 그림 7은 $Ra = 10^3$ 일 때의 등온선 분포 및 속도벡터를 나타낸 것이다. Rayleigh 수가 작은 경우에 비해서 더욱 상부 및 하부벽면 쪽으로 밀집되어 열 전달이 촉진됨을 알 수 있으며 경사각이 0° 일 때가 90° 보다는 흡수기 내부로 전달되는 열 전달이 활발함을 알 수 있다.

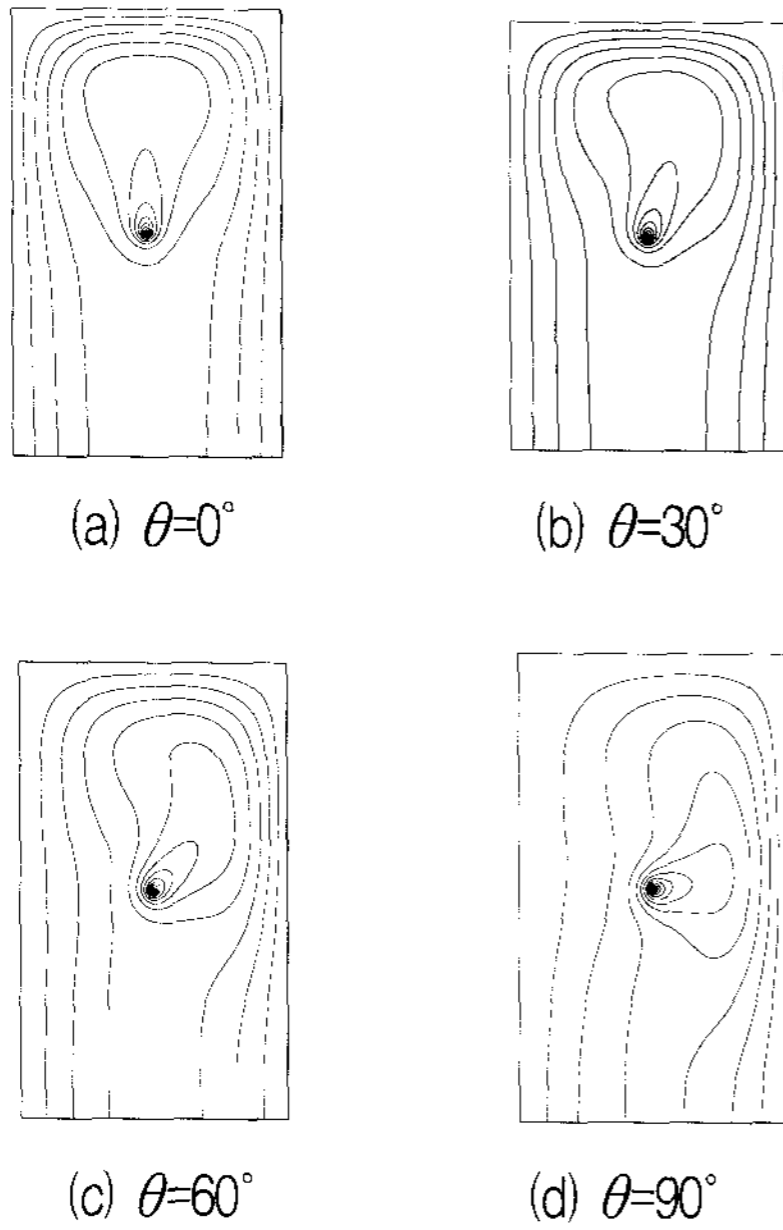


Fig. 2. Isotherms distributions of solar concentration absorber for tilt angle at $Ra = 10$.

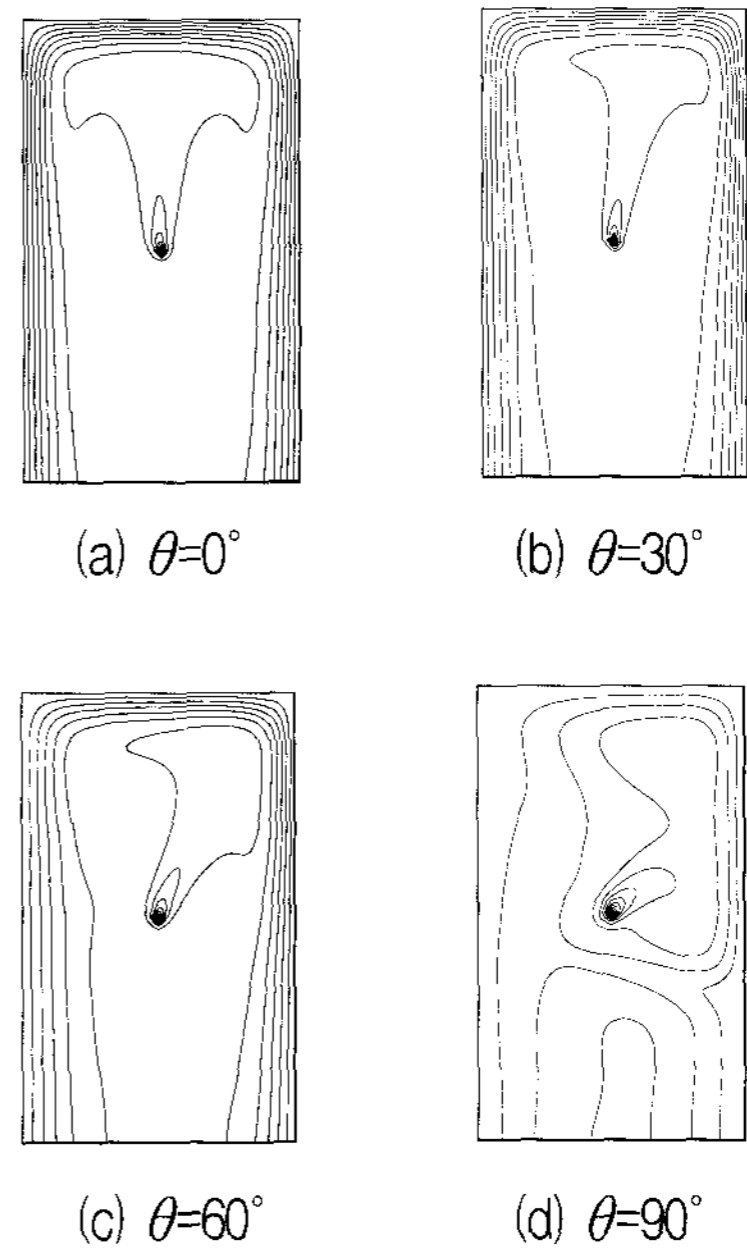


Fig. 4. Isotherms distributions of solar concentration absorber for tilt angle at $Ra = 10^2$.

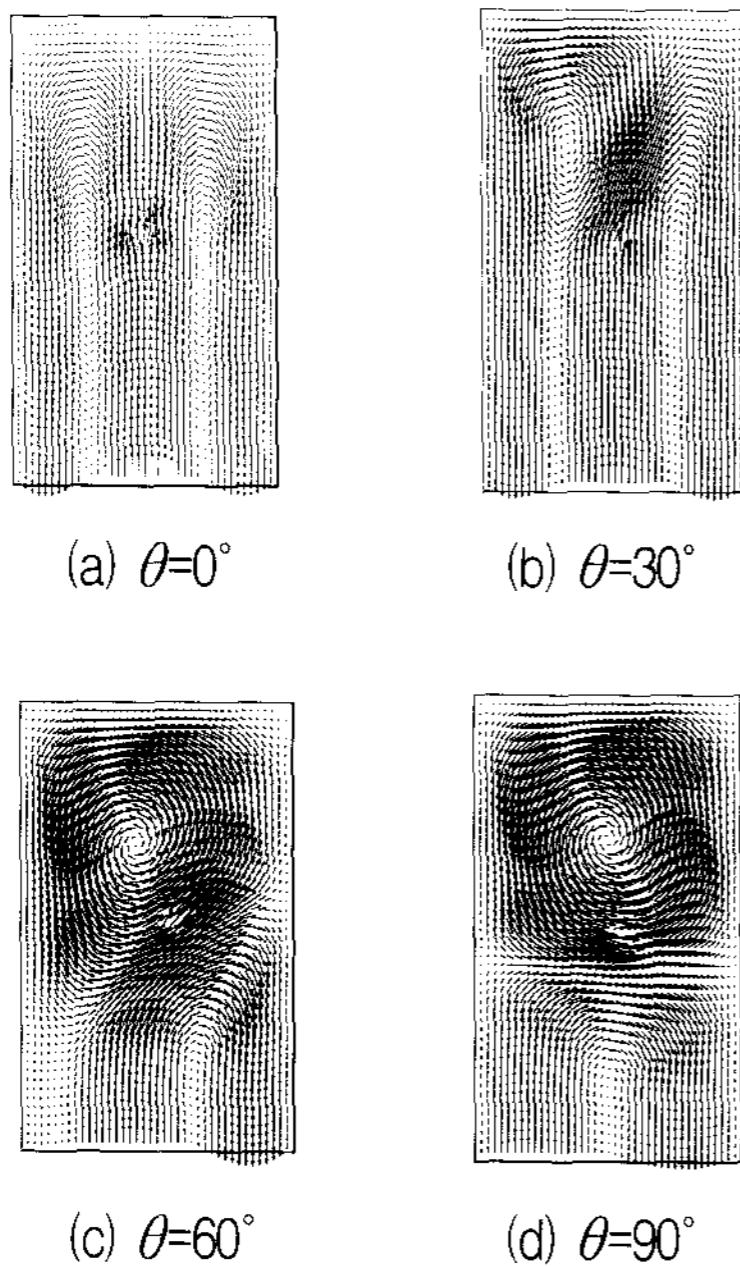


Fig. 3. Velocity vector distributions of solar concentration absorber for tilt angle at $Ra = 10$.

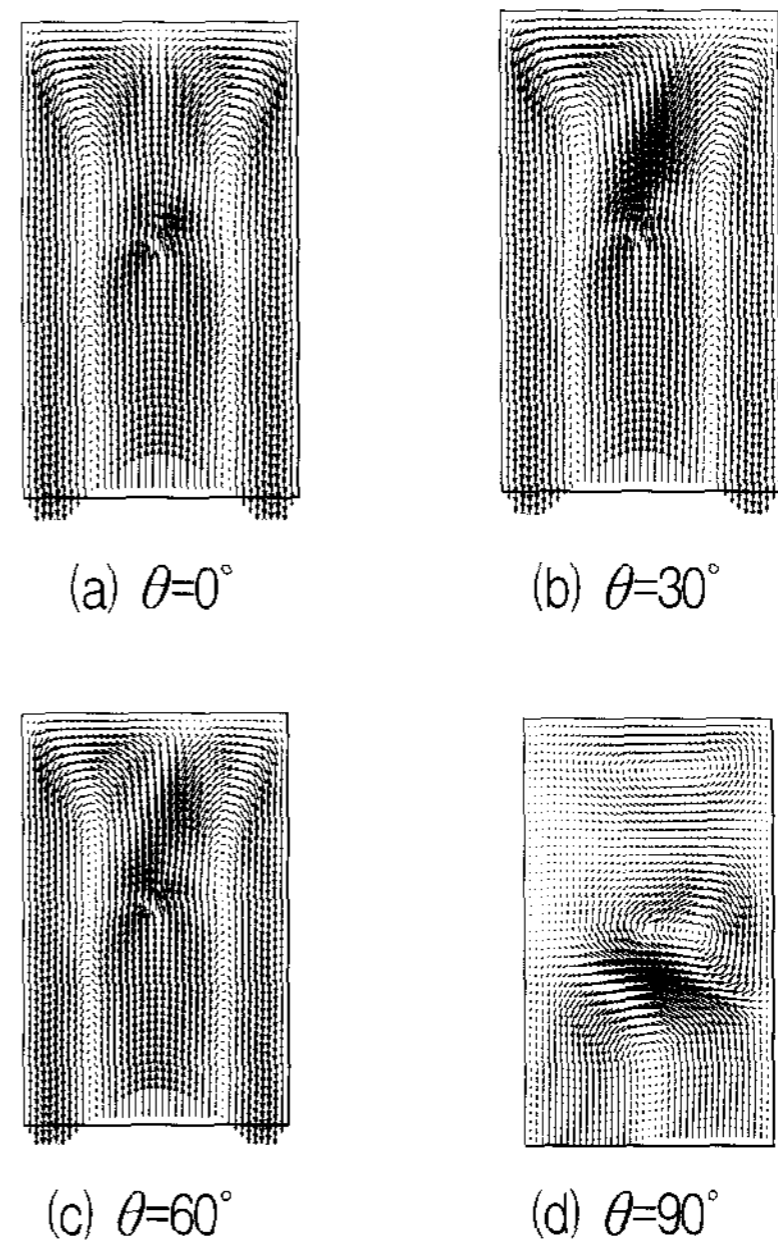


Fig. 5. Velocity vector distributions of solar concentration absorber for tilt angle at $Ra = 10^2$.

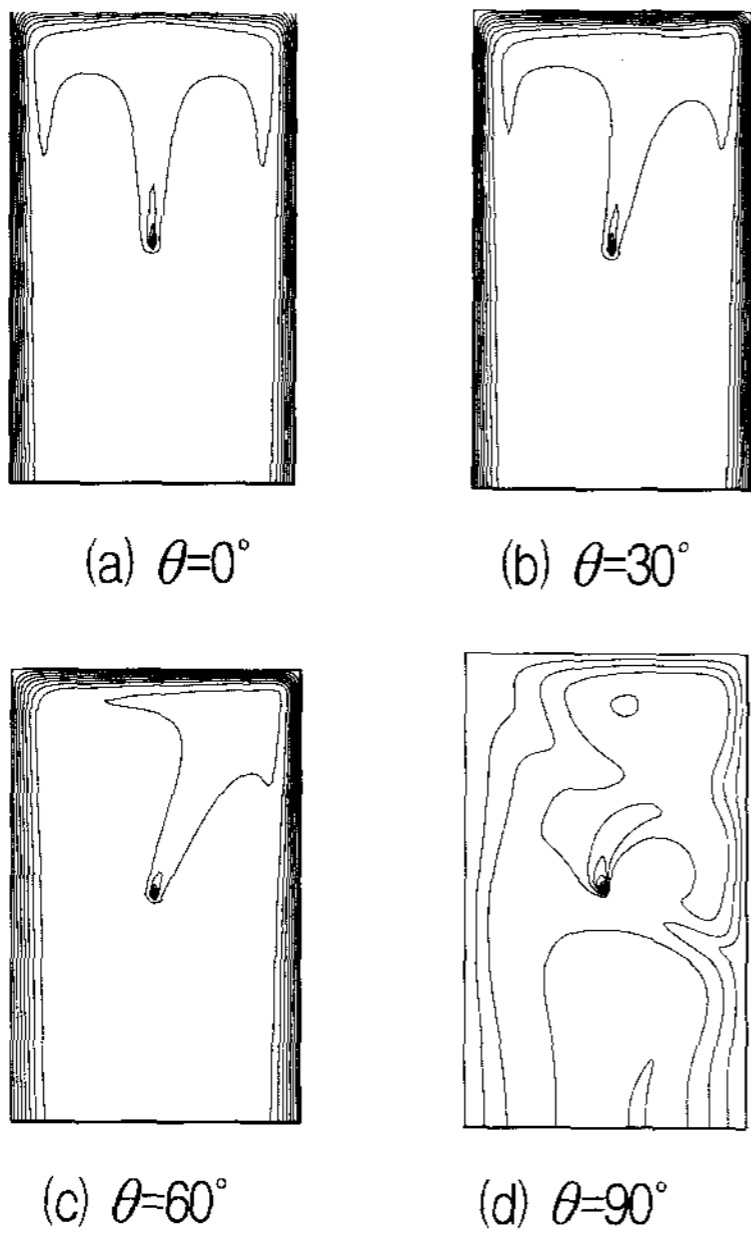


Fig. 6. Isotherms distributions of solar concentration absorber for tilt angle at $Ra = 10^3$.

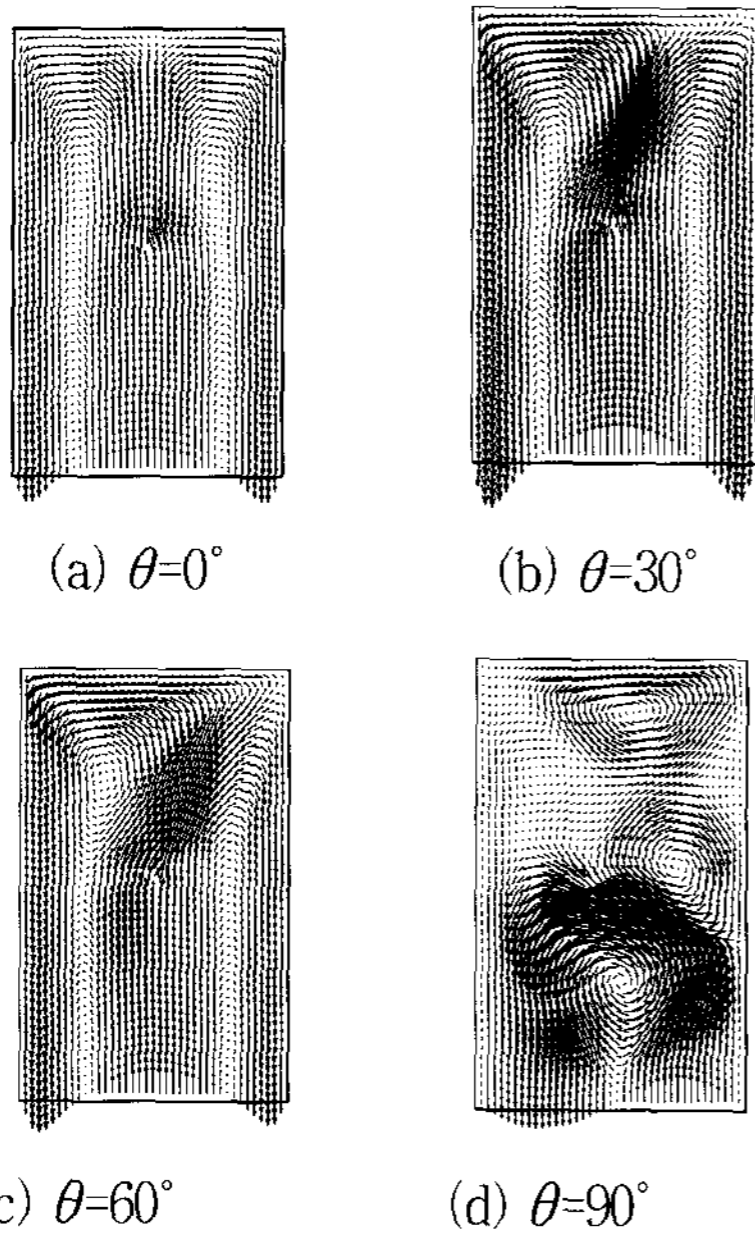
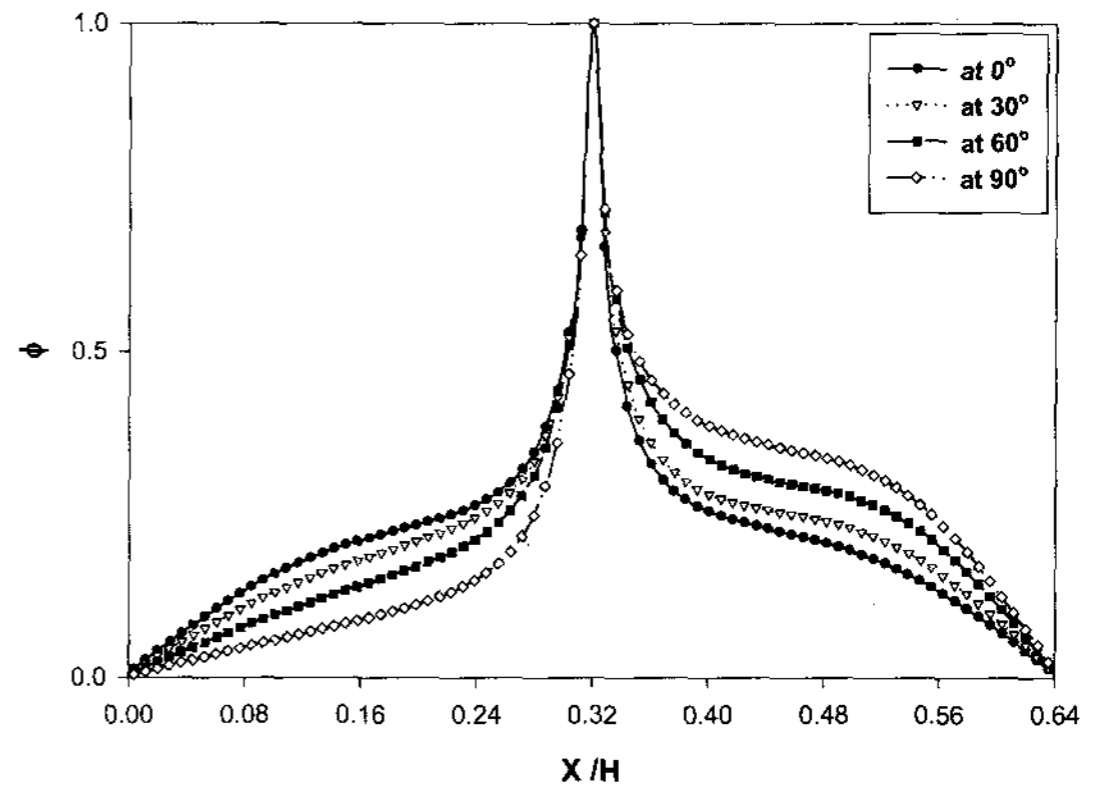
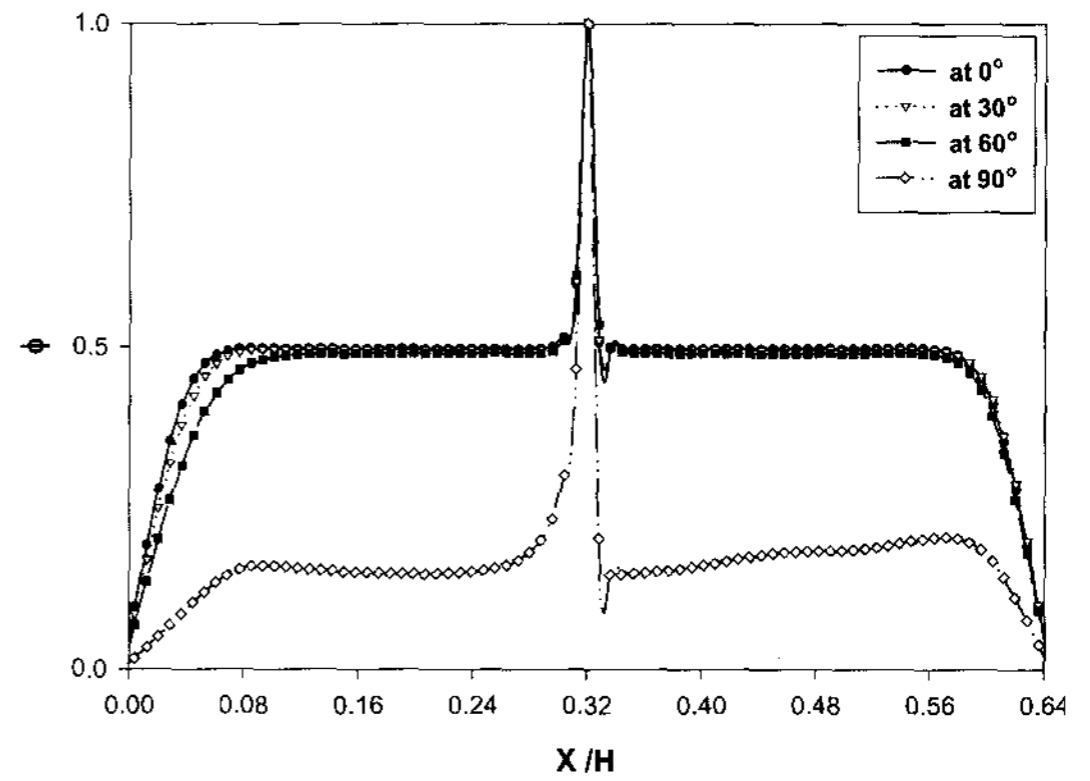


Fig. 7. Velocity vector distributions of solar concentration absorber for tilt angle at $Ra = 10^3$.

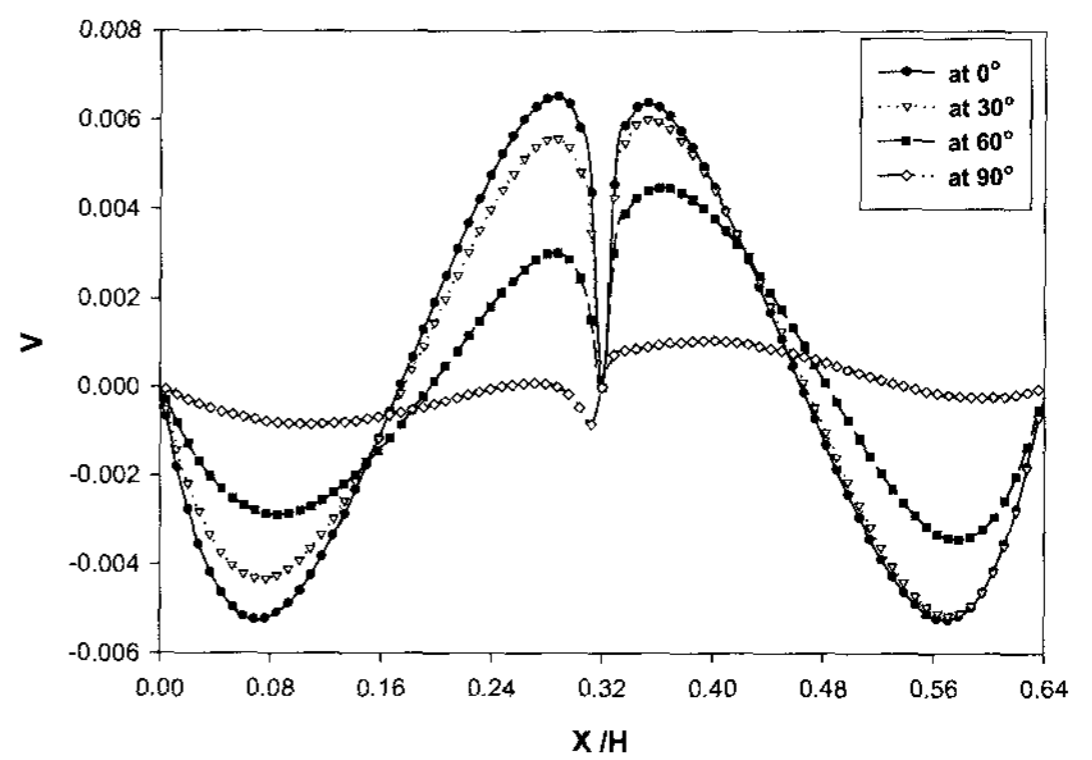


(a) $Ra = 10$

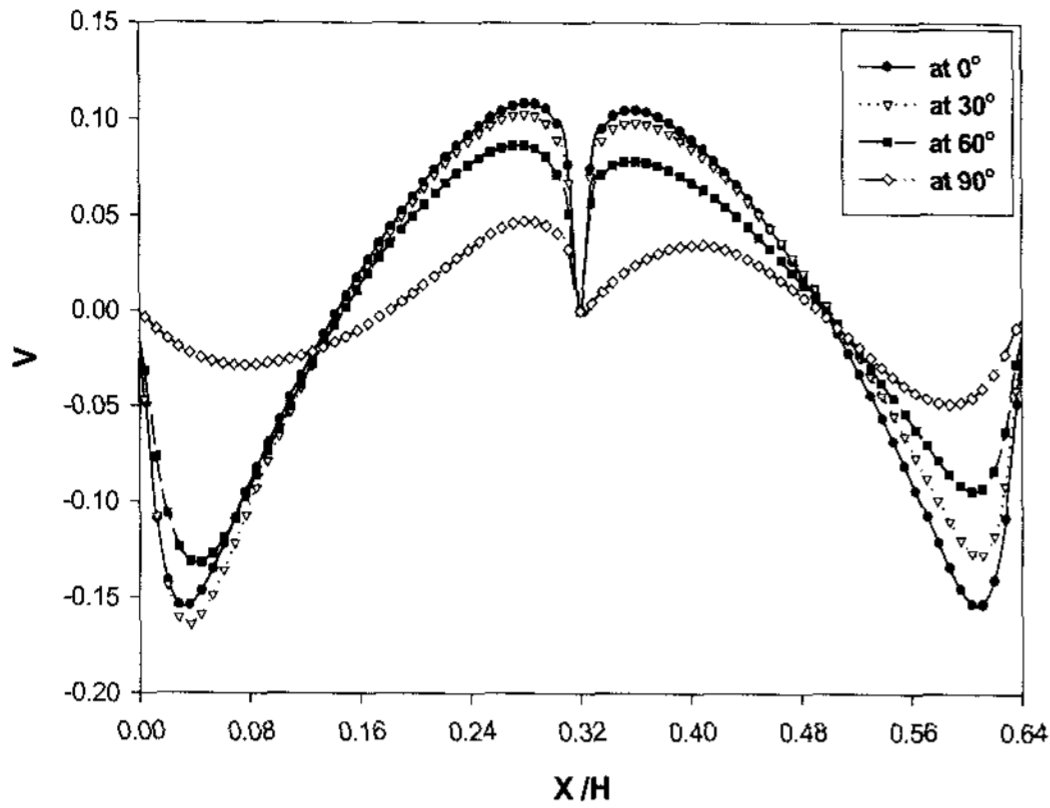


(b) $Ra = 10^3$

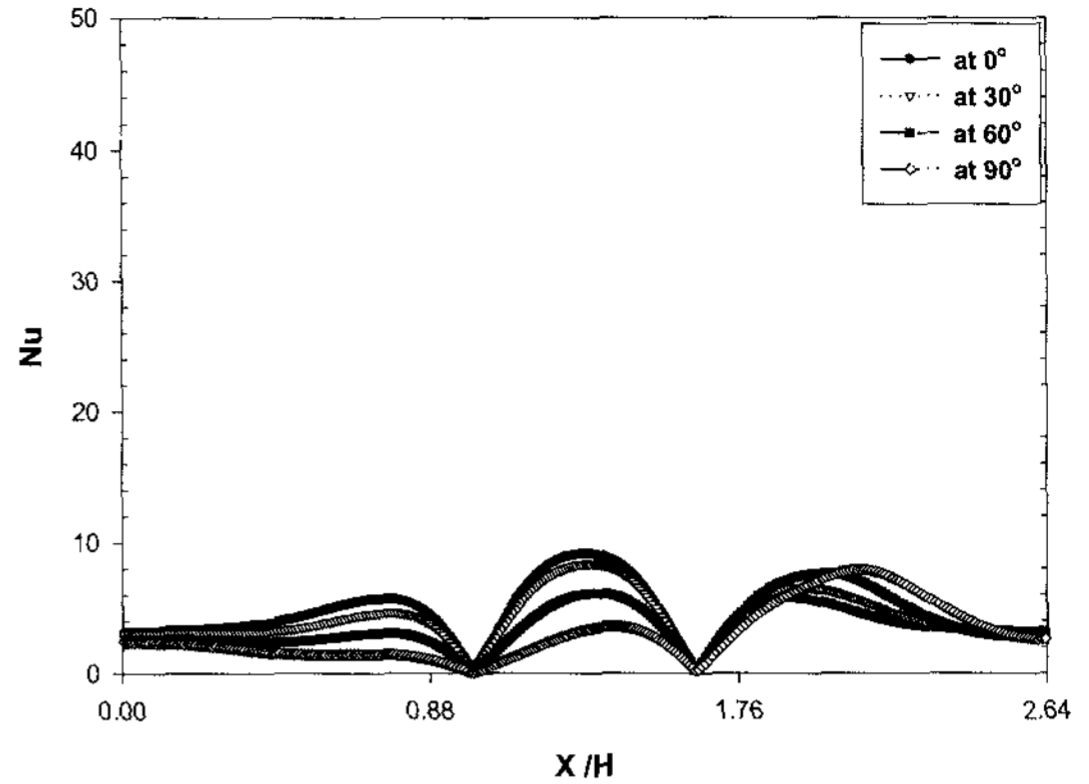
Fig. 8. Dimensionless temperature on vertical center section for various Rayleigh numbers.



(a) $Ra = 10$



(b) $Ra = 10^3$



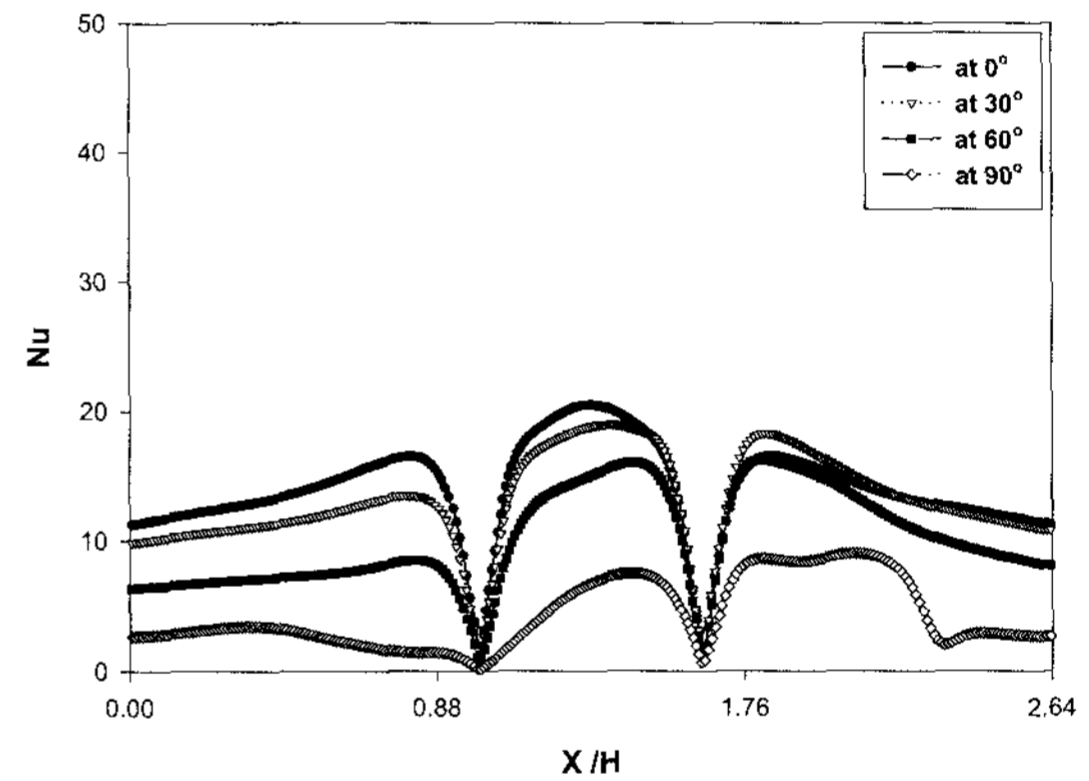
(a) $Ra = 10$

Fig. 9. Velocity on horizontal center section for various Rayleigh numbers.

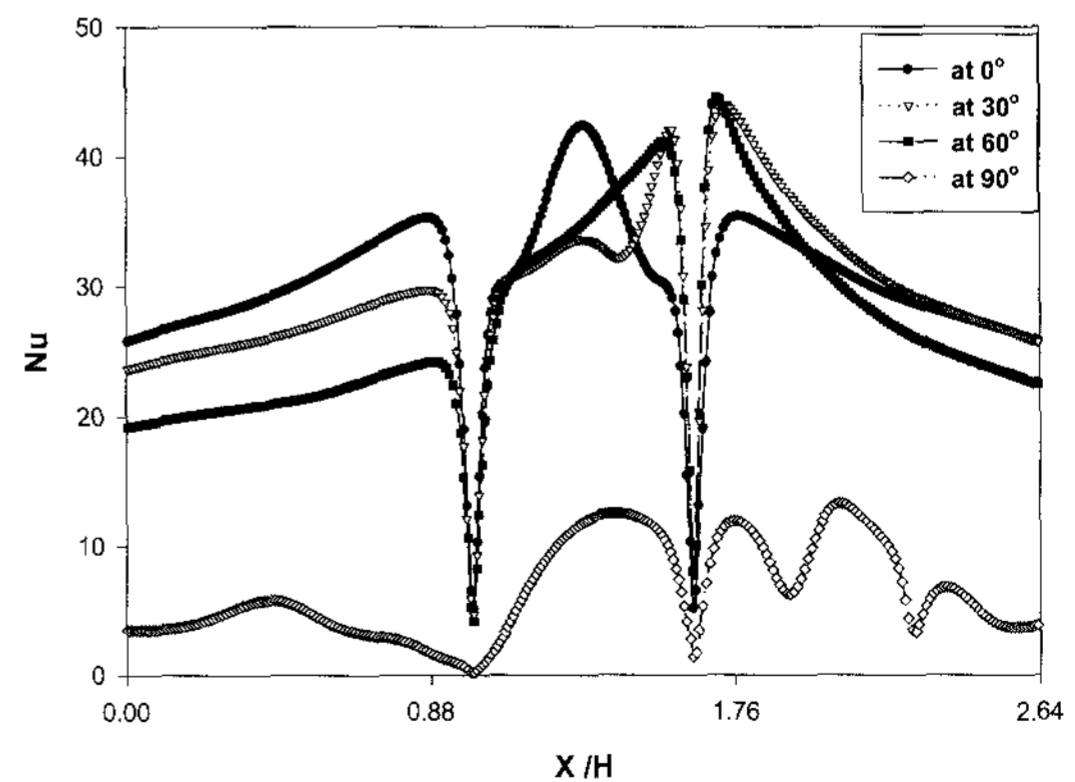
그림 8은 수직 방향의 중앙 단면에서의 등온선 분포를 표시한 것이다. $Ra = 10$ 인 경우에서 경사각도가 0° 일 경우의 온도 분포가 90° 일 경우보다도 높게 나타났다. 등온선 및 속도 분포와 마찬가지로 경사각이 0° 일 경우가 흡수기 내부로 전달되는 열 전달이 더욱 더 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. $Ra = 10^3$ 인 경우에도 경사각이 0° 일 경우가 온도 분포가 가장 높게 나타나고 있다.

그림 9는 수직 방향의 중앙 단면에서 각도의 변화에 따른 속도 분포를 표시하는 그림이다. (a) $Ra = 10$ 와 (b) $Ra = 10^3$ 의 두 경우 모두 경사각이 0° 일 때는 속도의 변화가보이지만 90° 일 때는 변화를 보이지 않는다. 등온선의 분포와 마찬가지로 경사각이 0° 일 때가 속도가 크며, 경사각이 커질수록 속도벡터의 크기도 점점 더 작아진다.

그림 10는 Rayleigh 수의 변화에 따른 상부 및 좌우 벽면에서의 국소 Nusselt 수를 표시한 그림이다. $Ra = 10$ 인 경우 경사각이 0° 일 경우가 Nusselt 수가 가장 높게 나타나며, 경사각이 커질수록 Nusselt수가 작아진다. $Ra = 10^2$ 과



(b) $Ra = 10^2$



(c) $Ra = 10^3$

Fig. 10. Local Nusselt numbers Distributions of top wall surface for various Rayleigh numbers.

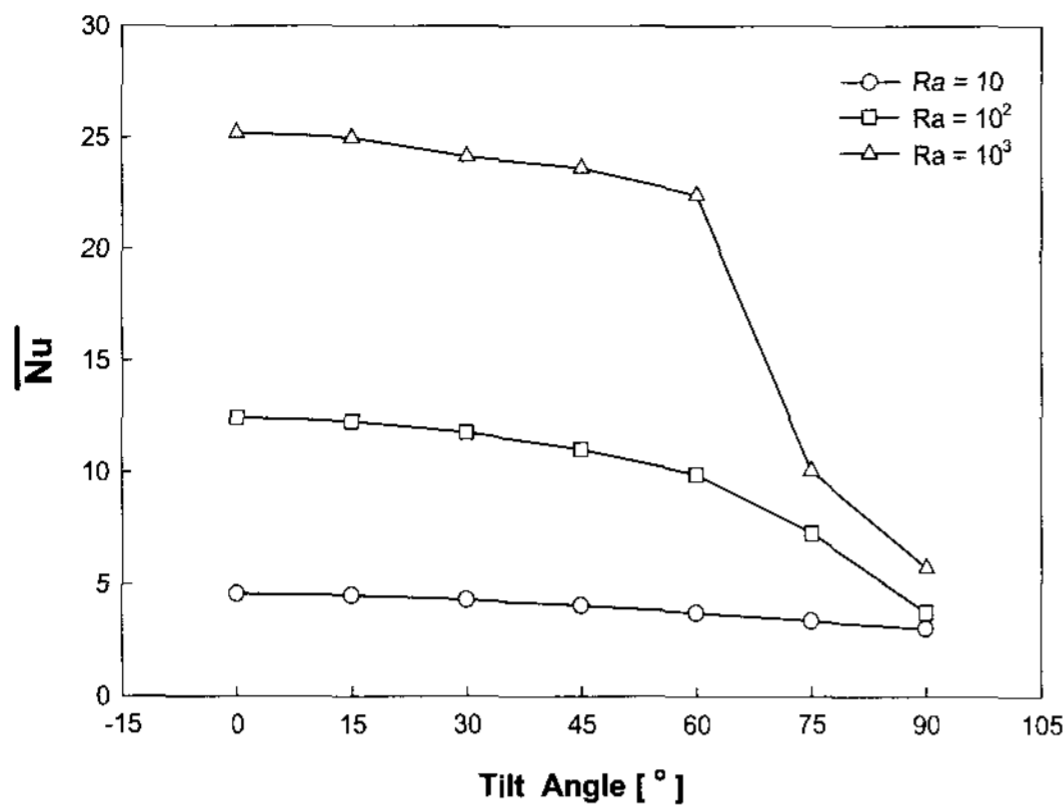


Fig. 11. Mean Nusselt numbers distributions of various tilt angle.

Table 1. Mean Nusselt numbers with the tilt angles and Rayleigh numbers

| | $Ra = 10$ | $Ra = 10^2$ | $Ra = 10^3$ |
|-----|-----------|-------------|-------------|
| 0° | 4.573 | 12.440 | 25.216 |
| 15° | 4.507 | 12.279 | 24.994 |
| 30° | 4.319 | 11.791 | 24.154 |
| 45° | 4.050 | 11.030 | 23.630 |
| 60° | 3.743 | 9.910 | 22.431 |
| 75° | 3.369 | 7.279 | 10.070 |
| 90° | 3.035 | 3.773 | 5.744 |

$Ra = 10^3$ 인 경우에도 경사각이 0° 인 경우가 Nusselt수가 가장 높게 나타나며 경사각이 증가할수록 Nusselt 수의 최대값이 감소한다. 각 경사각도에서의 국소 Nusselt 수의 값은 $X/L=0.32$ 에서 최대가 된다. 그리고 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 그리고 90° 에서 각각의 최대 국소 Nusselt 수는 표 1에 나타내었다. 즉, 경사각도가 증가함에 따라 낮은 국소 Nusselt 수가 나타나며, 경사각도에 따라 최대값의 위치가 오른

쪽으로 이동하고 있다.

그림 11은 경사각도에 따라서 상부 및 좌우 벽면에서의 평균 Nusselt 수를 나타낸 것이다. $Ra = 10, Ra = 10^2, Ra = 10^3$ 의 경우 모두 경사각이 0° 일 경우가 가장 크며, Rayleigh 수가 증가할수록 경사각도에 따른 평균 Nusselt수의 감소의 비가 작아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 Rayleigh 수가 증가함에 따라 열전달이 촉진된 결과이며 경사각도가 증가함에 따라 Rayleigh 수의 영향이 작아짐을 알 수 있다. 즉, Rayleigh 수 보다 경사각도에 크게 지배됨을 알 수 있다.

4. 결 론

수평면에 대하여 일정각도를 가지는 흡수기에 대한 열 및 유체의 유동을 수치해석한 결과는 다음과 같다.

1. 등온선 및 속도 벡터는 경사각이 0° 일 때가 흡수기 내의 전 영역으로 고르게 분포된다.
2. 등온선 및 속도 벡터는 Rayleigh 수가 커짐에 따라 벽면 쪽으로 밀집된다.
3. 평균 Nusselt 수는 경사각이 0° 일 경우가 가장 높으며 경사각이 커질수록 낮아진다.
4. Rayleigh 수가 커질수록 경사각도에 대하여 평균 Nusselt 수의 감소비가 작아진다.

후 기

본 연구는 한국해양수산개발원 지원 수산특정 과제 연구비와 BK21 지원 사업에 의해 연구되었으며 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. K.A. Magrinni, "Application of Solar Photocatalytic Oxidation to Voc-Containing Airstreams", RAES99-7691, Proceedings of the Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century, Hawaii, USA, 1999.
2. Henry W. Price and Rainer Kistner, "Parabolic Trough Solar Power for Competitive U.S. Markets", RAES99-7710, Proceedings of the Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century, Hawaii, USA, 1999.
3. 강용혁, 곽희열, 윤환기, 유창균, 이덕규, 서태범, "열 손실을 고려한 PTC 흡수기 최적 직경 결정에 관한 연구", 태양에너지, 20권, 1호, 2000, pp. 73~80.
4. 백남춘, 정시영, 신우철, 윤응상, 주문창, 박상래, "중온용 집열기를 이용한 태양열 냉난방 시스템 연구", 태양에너지, 16권, 3호, 1996, pp. 3~14.
5. 정종만, 서태범, 강용혁, "PTC형 집열기의 원관형 흡수기에서의 복합 열전달", 태양에너지, 20권, 1호, 2000, pp. 81~89.
6. 이재현, 김재근, 박만홍, "경사진 직사각형 공간 내에서 내부적으로 가열되는 유체의 자연 대류유동 및 열 전달", 대한기계학회지 제16권, 제3호, pp. 555~568, 1992.
7. 민문기, "직사각형 밀폐 공간 내 자연대류 열 전달의 수치해석", 공기조화냉동공학회지 제10권, 제3호, pp. 185~219, 1981.
8. 박광수, 박경우, 박희용, "유한 체적 법을 이용한 밀폐공간내의 자연대류-복사열전달 해석", 공기조화냉동공학회지 '97 하계 학술 발표대회 논문집, pp. 704~710, 1997.
9. 정효민, 이철재, 정한식, "사각형 공간 내의 난류자연대류 수치해석 모델에 관한 연구", 공기조화냉동공학회지 제12권, 제1호, pp. 33~39, 2000.