

# 태양열 집광 흡수기 입구의 개방비와 경사각도에 따른 열 유체 유동에 관한 수치해석

이상철\* · 이용훈\* · 최석천\* · 신유식\* · 정효민\*\* · 정한식†

## A Numerical Analysis on Thermal and Fluid in Solar Concentration Absorber with Tilt Angle and Opening Ratio of Absorber Entrance

Sang Chul Lee, Yong Hun Lee, Seuk Cheun Choi, You Sik Shin,  
Hyo Min Jeong, Han Sick Jeong.

**Key Words:** Aspect Ratio(중횡비), Heat Source(열원), Nusselt Number(누셀 수), Opening Ratio(개방비), Rayleigh Number(레이레이 수), Tilt Angle(경사각도)

### Abstract

This paper is the analysis of thermal and fluid in solar concentration absorber with various tilt angle and opening ratio of absorber entrance. The purpose of this study is to develop optimum solar concentration absorber, and the parameters for the study are the opening ratio of absorber entrance and the tilt angle. The aspect ratio of absorber was fixed at 0.64, and opening ratio was changed from 0.1 to 1.0. The finite volume method with SIMPLE computational algorithm are used and analyzed the heat transfer in absorber inside walls.

### 기호설명

$A$  : 표면적 [  $m^2$  ]

$Ar$  : 중횡비 [  $L/H$  ]

$Gr$  : *Grashof* 수

$H$  :  $Y$  방향의 무차원 길이

$L$  :  $X$  방향의 무차원 길이

$Nu$  : 국소 *Nusselt* 수

$\bar{Nu}$  : 평균 *Nusselt* 수

$Or$  : 중횡비 [  $P/L$  ]

$P$  : 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

### 그리스 문자

$\alpha$  : 열 확산계수 [  $m^2$  ]

$\beta$  : 열팽창계수 [  $K^{-1}$  ]

$\mu$  : 점성계수 [  $Pa \cdot s$  ]

$\nu$  : 동점성계수 [  $m^2/s$  ]

$\rho$  : 밀도 [  $kg/m^3$  ]

$\Phi$  : 무차원 온도

$\theta$  : 흡수기의 경사각도 [  $^{\circ}$  ]

† 경상대학교 기계항공공학부 해양산업연구소  
E-mail : hschung@nongae.gsnu.ac.kr  
TEL : (055)640-3185 FAX : (055)640-3188

\* 경상대학교 대학원

\*\* 경상대학교 기계항공공학부 해양산업연구소

### 1. 서 론

최근 유가의 급격한 인상과 환경에 대한 인식이 증가함에 따라 대체에너지는 풍력, 조력, 태양열 등 여러 가지가 있으나 현재 국내에서 가장 보편화되고 손쉽게 이용할 수 있는 태양열 에너지에 관한 연구가 가장 활발히 진행되고 있다. 태양에너지를 이용하는 태양열 집열기로는 국내 외를 막론하고 가장 일반적인 태양열 집열기는 평판형이다. 평판형 집열판을 이용하여 일사량과 집열판의 경사각에 연구도 현재 진행되었다. 또한 집열판의 효율을 증대시키기 위하여 집열판에서 전달된 온수를 저장하는 축열조의 급탕 시스템의 특성에 관한 연구도 진행되었다.<sup>1)~4)</sup> 평판형 집열판은 저온의 집열 온도와 넓은 설치면적으로 인한 단점이 있기에 현재는 사용량이 줄어들고 있는 추세이다. 이를 해결하기 위하여 저밀도의 태양열을 고 밀도화 시키기 위한 집열기의 활용이 두드러지고 있다. 이에 대하여 접시형 집광기를 채택함으로써 보다 고온의 시스템으로 접근이 가능하다. 이 접시형 집광 시스템은 태양광을 반사하는 반사기(Reflector)와 이반사된 태양 광을 집적하는 흡수기(Absorber)로 구성된다. 최근에 국내외적으로 각광을 받고 있는 중고온 이용 태양열 시스템 기술 개발의 필요성은 날로 증대되고 있다. 태양열 시스템에서 중온 이상을 얻기 위해서는 고집광 집열 시스템의 사용이 필요하다.<sup>5)~7)</sup> 본 연구는 접시형 태양열 흡수기 내에 집적된 열이 외부로부터 발생 가능한 강제 대류에 의한 손실을 줄이기 위한 방안을 도출한다. 즉 흡수기의 구조 변경으로 인한 흡수기내 열의 유동을 예측하여 흡수기의 형상을 최적설계하기 위하여 수치해석을 수행한다. 본 연구에서는 흡수기의 종횡비( $L/H$ )가 0.64이며 반사경에서 반사된 태양광이 흡수기의 내부에 일정하게 고정되어 있다는 가정에 의해서 수치해석을 하였다.<sup>8)~9)</sup> 주요변수로는 경사각도  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  와 개방비( $P/L$ )  $Or = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0$  에 대하여 최적의 열 전달 성능을 갖는 조건을 제시한다.

### 2. 수치해석

#### 2.1 계산 모델

채택한 계산 모델의 기하학적 형상은 Fig. 1과 같이 직사각형 내부에는 반사광에 의해 형성된 열원이 있으며 개구부( $P$ )는 대기에 개방되고 개구부를 제외한 모든 벽면은 저온( $T_c$ )으로 유지되며 흡수기의 중앙부에 고온( $T_h$ )의 열원이 존재하는 것으로 하였다. 흡수기의 모델 크기는  $L/H = 0.64$ 로 하였으며 무차원의 층류로 가정 한 방정식 해를 구하기 위하여 유한 체적법을 적용하였다.

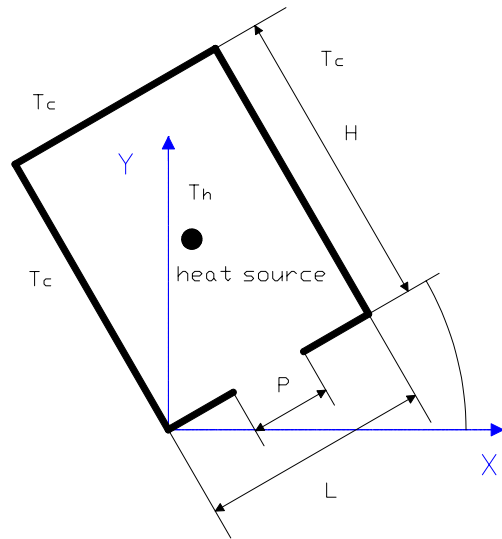


Fig. 1 Schematic diagram of numerical model for solar concentration absorber

#### 2.2 지배 방정식

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

연속방정식 :

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

운동량방정식 :

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

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

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.

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

$$Gr = \frac{g\beta(T_h - T_c)H^3}{\nu^2}$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

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

흡수기내의 열 유체유동에 대한 특성을 위한 경계조건은 다음과 같다.

· 개구부를 제외한 모든 벽면

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

· 하부벽면의 개구부

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

· 열원

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

### 2.3 수치 해석

유동장과 온도장을 해석하기 위하여 계산영역을 X축의 방향의 길이를  $L=0.64$ 로 Y축 방향의 길이를  $H=1$ 로써 격자간의 길이는 등 간격이고 직교 좌표계를 사용하여 수치해석을 실행하였다. 직사각형의 흡수기 내의 열원과 저온벽면에 대해 Rayleigh 수가 10 이고 개방비가  $Or = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1$  일 때, 수평면과의 경사각이  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  인 경우의 열 유체 유동에 대한 온도분포와 속도분포 대해서 해석하고 이에 따른 누설 수를 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

태양열 집광 흡수기는 개방비와 경사각도에 대하여 흡수기 내면의 열 유동 분포가 크게 달라진다. 여기서는 특히  $\theta = 0^\circ$  와  $\theta = 60^\circ$  의 경우에 대하여 고찰하도록 한다. 이것은 태양열을 이용하기 위한 계절적인 특성으로서 각각 여름과 겨울철의 우리나라에서 태양열을 가장 잘 받는 각도이다.

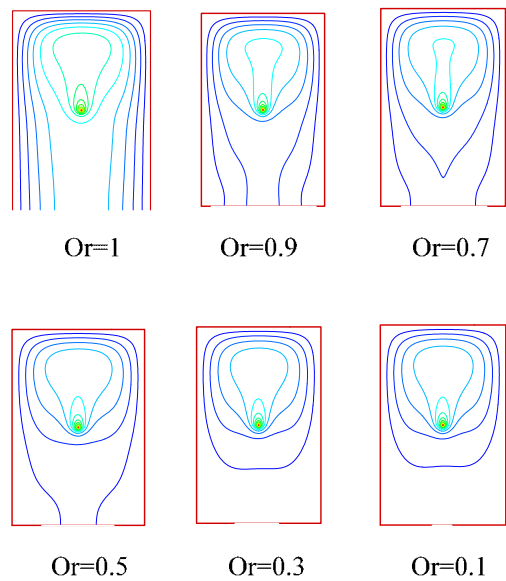
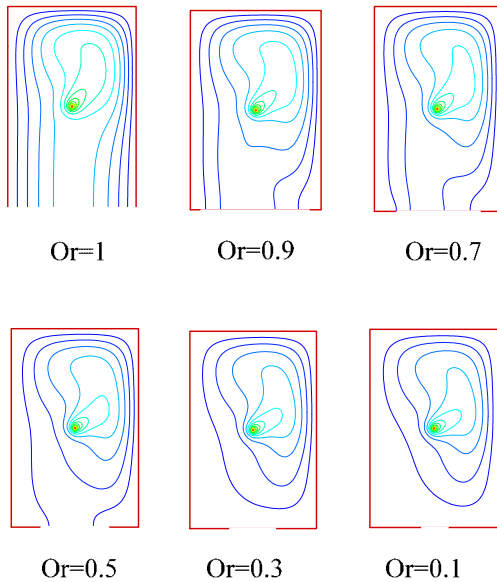


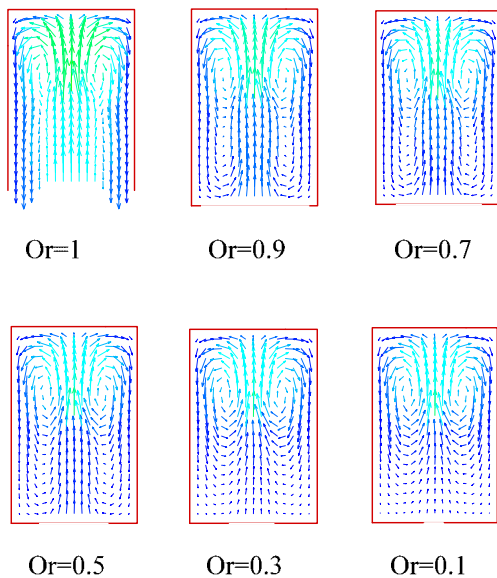
Fig. 2 Isotherms distributions of solar concentration absorber by opening ratio at  $\theta = 0^\circ$ ,  $Ar = 0.64$ ,  $Ra = 10$ .

Fig. 2는 경사각  $\theta = 0^\circ$ ,  $Ar = 0.64$ ,  $Ra = 10$ 일 때 각 개방비에 따른 등온선 분포를 나타낸 것이다. 경사각이  $\theta = 0^\circ$  일 때 흡수기의 수직단면을 기준으로 좌우가 대칭적인 온도 분포가 형성된다. 그러나 개방비가 작아짐에 따라 벽면층의 온도 분포의 밀집현상이 완화되고 대류현상이 둔화되면서 내부의 열원들이 흡수기 내부에 머무는 현상을 볼 수 있다. 이것은 개방비가 작아짐에 있어서 흡수기 아래의 좌우벽면에 의해 와류현상이 일어나 흡수기 내의 열원이 대기로 잘 빠져나가지 않고 내부에서 맴돌기 때문이다. 그래서  $Or = 1$ 에서는 대류현상이 활발히 일어나기 때문에 온도 분포가 전반적으로 넓게 고루 분포하는데 비해 개방비가 작을수록 중앙에 열원이

집중되어 있다. 개방비  $Or = 0.1$ 일 때는 열원의 출력이 극히 작음을 나타내 보이고 있다.



**Fig. 3** Isotherms distributions of solar concentration absorber by opening ratio at  $\theta = 60^\circ$ ,  $Ar = 0.64$ ,  $Ra = 10$ .

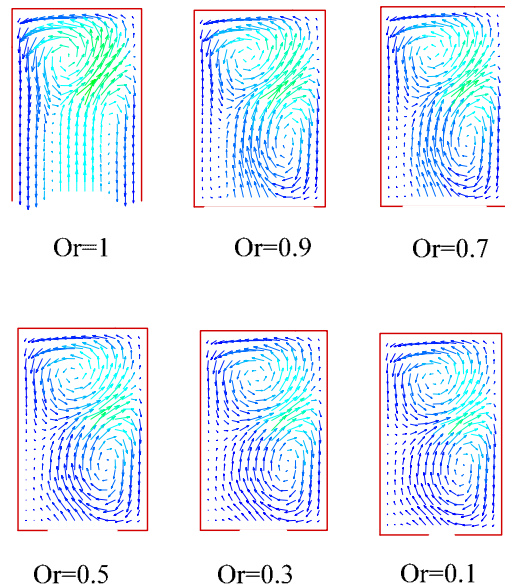


**Fig. 4** Velocity vector distributions of solar concentration absorber by opening ratio at  $\theta = 0^\circ$ ,  $Ar = 0.64$ ,  $Ra = 10$ .

Fig. 3은  $\theta = 60^\circ$ ,  $Ar = 0.64$ ,  $Ra = 10$  일때의 흡수기 내 개방비에 따른 등온선 분포를 나타낸 그림이다. 경사각  $\theta = 0^\circ$  일 때보다 오른쪽벽

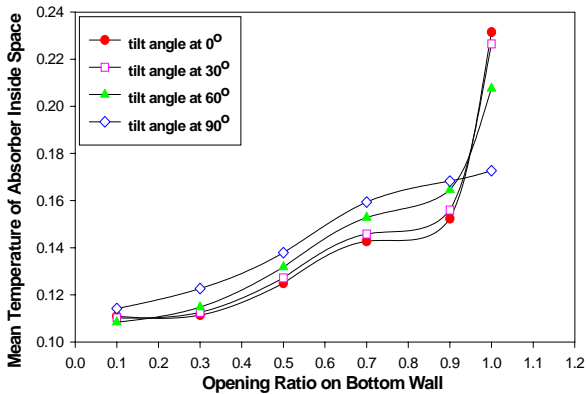
면으로 등온선 분포가 밀집된다. 이것은 오른쪽 벽면으로 열 전달이 일어나고 있다는 것이다. Fig. 2와 비교할 때 경사각이 커지고 개방비가 작아짐에 따라 온도 분포가 고르지 않고 열 전달 현상이 둔화된다는 것을 알 수 있다.

Fig.4는 개방비에 따른 흡수기의 속도벡터 크기와 방향을 함께 나타낸 것이다. 개방비  $Or = 1$ 의 경우에는 흡수기의 중앙으로 대기의 저온이 들어 오고 내부의 열원은 상부 벽면과 좌·우 벽면을 따라 대기로 나가는 대류현상이 일어나지만  $Or = 0.9$  이하로는 흡수기 하부의 좌·우 벽면에 의해 흡수기 내부에서 와류현상이 일어나게 되어 내부의 열원이 벽면을 타고 대기로 바로 나가지 못해 열 전달이 잘 일어나지 않고 있다.

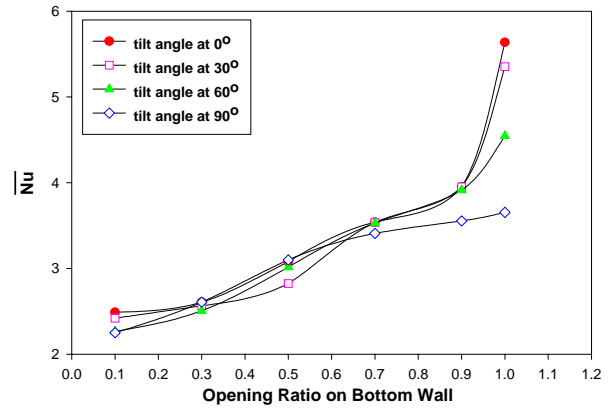


**Fig. 5** Velocity vector distributions of solar concentration absorber by opening ratio at  $\theta = 60^\circ$ ,  $Ar = 0.64$ ,  $Ra = 10$ .

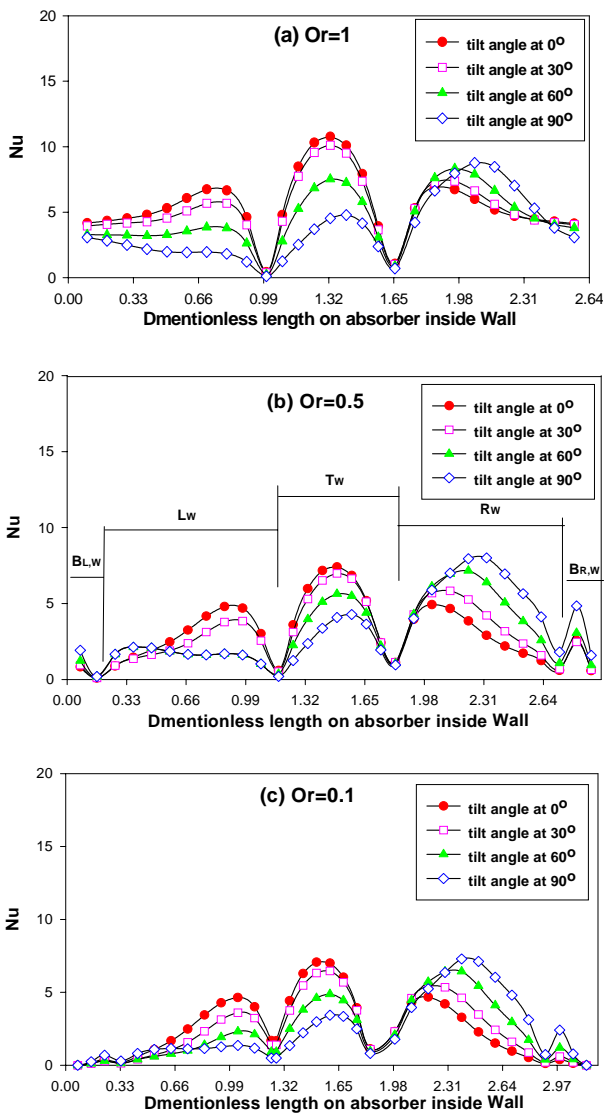
Fig. 5는  $\theta = 60^\circ$  일 때의 각 개방비에 따른 속도 분포를 나타내었다. 경사각이 의 변화로 인해 흡수기 내의 윗면과 우측면 사이로 열 전달이 일어나는 것을 알 수 있다. 하지만  $\theta = 0^\circ$  일 때 보다는 속도 분포가 원활하지 않고 불균형을 이루고 있다. 또 개방비가 작아질수록 속도 벡터가 내부에서 소용돌이 형상으로 맴돌고 있다. 이것은 흡수기 하부의 벽면의 개방비의 영향을 많이 받고 있다는 것이다.



**Fig. 6** Mean temperature of solar concentration absorber inside space by opening ratio and tilt angle at  $Ar = 0.64$ ,  $Ra = 10$ .



**Fig. 8** Mean Nusselt numbers distributions by various opening ratios and tilt angle.



**Fig. 7** Local Nusselt numbers distributions of wall surface by each opening ratio and tilt angle.

Fig. 6은 각 경사각도와 개방비에 따른 흡수기 내의 평균온도를 나타낸 그래프이다. 흡수기 내의 평균온도는 개방비의 커짐에 따라 증가하고 있다.  $Or = 1$ 일 때는 경사각의 증가에 따라 평균온도가 감소한다. 즉,  $\theta = 0^\circ$  일 때 평균 온도가 가장 높게 나타나는 것은 열 전달이 가장 활발하게 일어나 흡수기 내부의 온도가 넓게 분포되어 있기 때문이다. 하지만 개방비가  $Or = 1$  이하에서는 반대로 경사각이 증가함에 따라 평균온도가 높게 나타난다. 이것은 즉  $\theta = 90^\circ$  일 때 대류현상이 활발하여 열 전달이 잘된다는 것을 나타낸다.

Fig. 7은 개방비와 경사각에 따른 각 벽면의 국소 누셀 수를 나타낸 그래프이다.  $Or = 1$ 일 때 가장 높은 누셀 수를 가지며  $\theta = 0^\circ$  일 때는 흡수기의 수직 단면을 중심으로 좌우 벽면이 대칭적인 국소 누셀 수를 가진다. 하지만 경사각이 커질수록 그래프가 오른쪽 방향으로 기울어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 경사각이 증가함에 따라 차츰 오른쪽 벽면의 열 전달이 활발히 일어나 조밀한 온도 분포를 형성하기 때문이다.

Fig. 8은 경사각도와 개방비에 따른 각 벽면에서의 평균 누셀 수를 나타낸 것이다. 그래프에서 보다시피 평균 누셀 수는  $Or = 1$ 일 때의  $\theta = 0^\circ$  에서 가장 높게 나타난다. 하지만 개방비가  $Or = 0.3$ ,  $Or = 0.5$ 에서는  $\theta = 90^\circ$  일 때가  $\theta = 0^\circ$  일 때 보다 오히려 평균 누셀 수가 높게 나타난다.

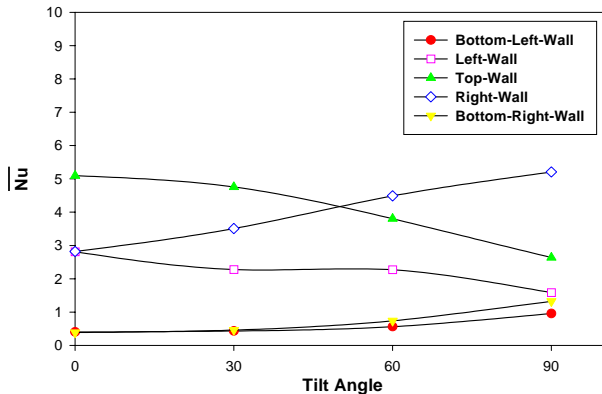


Fig. 9 Mean Nusselt numbers distributions by various tilt angles.

Fig. 9는 경사각에 따른 흡수기 내부 각 단면의 평균 누셀 수를 나타낸 그래프이다. 경사각  $\theta = 0^\circ$  일 때 흡수기 내의 상부벽면(Top-Wall)이 최대의 평균 누셀 수를 가지며, 경사각이 커질수록 상부벽면(Top-Wall)과 좌측벽면(Left-Wall)의 평균 누셀 수가 작아지고 우측벽면(Right-Wall)과 하부우측벽면(Bottom-Right-Wall)의 평균 누셀 수는 증가한다. 이것은 고 열원의 공기 밀도가 저 열원의 공기 밀도보다 작아 부력에 의해 상부로 올라가므로 경사각이 커짐에 따라 흡수기 내의 열원에 의한 대류의 방향이 상부벽면에서 우측벽면으로 이동하기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고집광 효율을 위한 흡수기의 기초설계 자료를 위하여 흡수기의 형상 변화가 열 전달에 미치는 영향에 관하여 수치해석 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 흡수기는 개방비  $Or = 1$ 이고 경사각이  $\theta = 0^\circ$  일 때 가장 열 전달이 활발히 일어난다.
- (2) 개방비가 작아짐에 따라 대류 현상이 둔화되어 온도 분포 범위가 작아진다.
- (3) 개방비  $Or = 1$ 일 때에는 경사각이 커질수록 열 전달이 둔화되나  $Or = 1$ 이하의 개방비를 가지는 흡수기의 열 전달은 경사각이 클수록 더욱 활발해진다.
- (4) 흡수기의 전체의 평균 누셀 수는 개방비  $Or = 1$ 이고 경사각  $\theta = 0^\circ$  일 때 가장 높게 나

타나며 개방비가 작아짐에 따라 평균 누셀 수는 작아진다.

#### 후기

본 연구는 해양수산개발원 지원의 수산특성과제(NO.09980004) 연구비와 경상대학교 BK21 지역대학육성사업단 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) C.O.Kim, Y.W.Chung, J.H.Kim, N.K.Chung, Y. G.Oh, 2002, "A Study on Efficiency Improvement of Household's Solar Hot Water Supply System", KSME, pp.2453-2458.
- (2) Donghyuk Lee, Jonghoon Jang, 2002, "An Analysis of Thermal Storage Tank", KSME, pp.2131-2136.
- (3) In-Ju Hwang, Hyun-Joon Shin and Hong-Cheol Lee, 2000, "An Experimental Study on the Operating Characteristics of Solar Assisted Hot Water System for Apartment Houses", KSME, pp. 2155-2130.
- (4) 1991, "Solar Energy Hand Book" pp.1-2
- (5) In-Ju Hwang, Hong-Cheol Lee, Chung-Sik Cho, Hyun-Joon Shin, 2002, "A Study on the Characteristics Analysis of the Solar Assisted Hot Water System for Apartment House", KSME, pp.2477-2482.
- (6) Y.C.Park, Y.H.Kang, 1999, "A Study on the Development of the Two Axes Sun Tracking System for the Parabolic Dish Concentration", 1999, Solar Energy, Vol. 19, No. 4, pp.81-91
- (7) Myoung-Kuk Ji, 2002, "Study on the Solar System for Application on the Sea", Gyeongsang National University, Master's Thesis
- (8) S.Y.Ryu, T.B.Seo. Y.H.Kang, 2000, "An Analysis of Heat Losses from Receivers for a Multifaceted Parabolic Solar Collector", Solar Energy, Vol. 20, No. 2, pp.61-73
- (9) Young-Hun Lee, 2003, "A Study on Heat Transfer in the Absorber of Solar Concentration System", Gyeongsang National University, Master's Thesis