

태양열 집열판 공기층의 열 및 유체유동

배강열* · 이중섭* · 이광성* · 정효민** · 정한식**

Thermal and Fluid Flow of the air layer in a solar collector

Kang Youl Bae*, Chung Sop Yi*, Kwang Sung Lee*
Hyo Min Jeong**, Han Shik Chung**

Key Words: Tilt Angle(경사각도), Air Layer(공기층), Nusselt Number(누셀수)
Solar Collector(태양열집열판)

Abstract

This study represents numerical analysis on the thermal and fluid flow of the air layer in a solar collector. The boundary conditions was assumed that the top and bottom wall of the air layer have a heating and cooling surface, respectively, and this calculation model have a solid body with a cooling temperature of 20°C. As the results of simulations, the magnitudes of the velocity vectors and isotherms are increased proportionally to the tilt angles. As the tilt angle is increased, the mean Nusselt numbers are increased and the maximum value of the mean Nusselt number was appeared at tilt angle $\theta = 75^\circ$.

기호설명

<p>a : grid a space regulation coefficient</p> <p>g : gravity acceleration[m/s²]</p> <p>Gr : Grashof number</p> <p>H : vertical length[m]</p> <p>k : turbulent energy[m²/s²]</p> <p>L : horizontal wall length[m]</p> <p>Nu : local Nusselt number</p> <p>\overline{Nu} : mean Nusselt number</p> <p>Pr : Prandtl number</p>	<p>T : temperature[°C]</p> <p>T_h : heated wall temperature[°C]</p> <p>T_c : cooled wall temperature[°C]</p> <p>U : X direction velocity[m/s]</p> <p>V : Y direction velocity[m/s]</p> <p>Greek letter</p> <p>β : thermal expansion coefficient[K⁻¹]</p> <p>ϵ : turbulent energy dissipation rate</p> <p>θ : solar collector tilt angle[°]</p> <p>μ_t : turbulent eddy viscosity[kg/ms]</p> <p>ρ : density[kg/m³]</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

* 경상대학교 대학원

** 경상대학교 수송기계공학부, 해양산업연구소

현재 사용중인 에너지의 대부분을 차지하고 있는 화석 연료는 환경오염 및 지구 온난화 현상등 심각한 공해 문제를 야기하고 있으며 전 세계적으로 환경친화적인 에너지 자원의 개발과 활용을 촉진중이며 국내의 경우 에너지의 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정이다.

태양열 에너지는 밀도가 낮고, 계절별, 시간별 변화가 심한 에너지이기 때문에 태양열의 집열과 축열기술이 가장 기본이 되는 기술이며 전 세계적으로 이러한 기본기술의 확보를 위해 많은 연구가 진행중이다. 그 중에서도 가장 광범위하게 연구되고 있는 분야가 평판형 집열판이다.⁽¹⁾⁻⁽²⁾ 또한 근래에 들어서는 집열판을 이용하여 건물의 냉난방에 사용되는 보조열원으로써 각광을 받고 있으며 집열기의 최적설계를 위한 많은 연구와 진공관, 흡수기 등을 이용하여 고효율을 얻기 위한 연구가 진행 중이다.⁽³⁾⁻⁽⁵⁾

집열판의 경우 계절별, 지역별로 약 60° 정도의 각도로 설치되고 있지만 이에 관한 구체적인 연구 보고는 미미한 편이다. 일정한 중횡비를 가지고 있으며 정방형의 밀폐공간에 대한 열 및 유체유동에 관해서도 많은 보고가 있다.⁽⁶⁾ 특히 집열판내의 공기층은 중횡비가 최소 5이상의 형상으로 하고 있으며 이에 관한 현실적인 연구검토가 필요하다.

본 연구에서는 현재 가장 널리 사용되고 있는 평판형 집열판에 대해 집열판과 집열표면사이에 있는 공기층에 대한 열 및 유체유동을 경사각도에 대해서 수치적으로 해석하여, 열전달이 가장 활발하게 일어나는 집열판의 경사각도를 찾음으로서 수치해석을 통한 평판형 집열판 연구의 기본 방향을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

수치해석모델의 형상은 Fig. 1과 같으며, X방향의 폭이 L=0.2m이고 Y방향의 높이 H=0.03m인 집

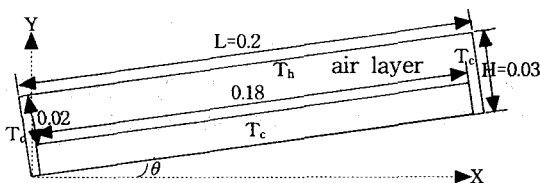


Fig. 1 Schematic diagram of numerical model.

열판의 2차원 형상이다. 상부벽면이 태양열을 받아 일정온도로 가열되고, 좌우벽면은 대기에 노출되어 있기 때문에 일정한 온도($T_c=20^\circ\text{C}$)로 냉각되고 있으며, 하부벽면은 단열면을 취하였다. 또한 집열판의 내부는 상온의 유체가 흐른다고 가정하여 일정한 온도 ($T_c=20^\circ\text{C}$)로 냉각되고 있으며 수치해석 기법으로는 선행연구⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾를 통하여 저 레이놀즈 수모델이 비교적 실험치를 잘 재현 하였으므로 본 연구에서도 Launder와 Sharma가 제안한 제 레이놀즈수모델을 도입하였으며, 기본 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial X_j} = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} \right) + \left(\frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial X_j} [\rho \overline{u_i u_j}] + B_{u,v} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i T)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\frac{\mu}{P_r} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial X_i} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] + G - \rho \epsilon + B_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho U_j \epsilon)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G - C_{2\epsilon} \frac{\rho \epsilon^2}{k} - B_\epsilon \quad (5)$$

여기서

$$B_u = \rho g \beta \Delta T \cdot \sin \theta, \quad B_v = \rho g \beta \Delta T \cdot \cos \theta \quad (6)$$

$$B_k = B_\epsilon = g \beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \left(\frac{\partial T}{\partial X} \sin \theta + \frac{\partial T}{\partial Y} \cos \theta \right) \quad (7)$$

본 연구에서 적용된 난류상수는 Table 1에 나타내었다. 이상의 주어진 방정식으로부터 각각의 변수를 구하기 위하여 유한체적법(Finite Volume Method)을 채택하였으며, 압력항의 계산은 SIMPLE알고리즘을 이용하였다.⁽¹⁰⁾ 또한 계산격자

Table 1 The standard constants and function of the turbulent model.

$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	σ_ϵ	σ_k	σ_t
1.44	1.92	1.3	1.0	0.7

는 열원 근처와 벽 근처에서 물리적인 현상을 자세히 알아보려고 좀더 조밀하게 배치시키기 위해서 다음의 식(8)에 의하여 부등간격의 격자로 하였다.

$$X_i = X_{\max} [-0.5 \tanh \left\{ a \left(2 \frac{i}{n-1} \right) / \tanh(-a) + 0.5 \right\}] \quad (8)$$

여기서 n 은 X축 방향의 격자수, i 는 격자의 좌표, a 는 격자 간격을 조정하는 계수이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 열매체의 온도와 공기층 상부 온도차가 $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ 일 때 경사각도에 대하여 등온선분포를 나타낸 그림이다. 경사각도가 0° 일 경우에는 등온선이 집열판의 상부에서 집열판쪽으로 일정한 분포를 보이고 있으며 좌우가 거의 대칭적인 분포를 보이고 있다. 그러나 경사각도가 커질수록 등온선은 오른쪽 벽면쪽으로 밀집되는 현상을 보이고 있다. 이것은 가열된 공기가 부력의 영향에 의하여 집열판이 경사진 방향으로 밀집되는 것이다. 또한 상대적으로 집열판의 왼쪽벽면으로는 등온선의 분포가 적다. 경사각도가 증가할수록 집열판으로의 열전달은 오른쪽벽면에서 더욱더 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ 일 때 경사각도에 대하여 속도벡터의 분포를 표시한 그림이다. 경사각도가 0° 인 경우에는 공기층내부에 속도벡터가 거의 형성되지 않으며 좌우벽면쪽에서만 유동장이 나타나고 있다. 그러나 경사각도가 증가할수록 상부벽면에서는 왼쪽에서 오른쪽으로 속도벡터가 형성되며 공기층내부에서는 상부에서 하부로 대류를 일으키고 있다. 경사각도가 증가할수록 속도벡터의 크기는 더욱더 크게 형성되고 있으며 이것은 경사각도

가 커짐에 따라서 집열판의 상부에서 집열판쪽으로의 열전달이 활발히 진행되기 때문이다.

Fig. 4는 $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ 일 때 경사각도에 대한 등온선 분포를 표시한 그림이다. 경사각도의 변화에 따른 등온선분포는 $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ 일 경우가 유사한 변화를 보이고 있으나 온도차이가 증가함에 따라 등온선은 집열판의 상부와 집열판의 상부 및 우측 벽면쪽으로 더욱더 밀집됨을 발견할 수 있다.

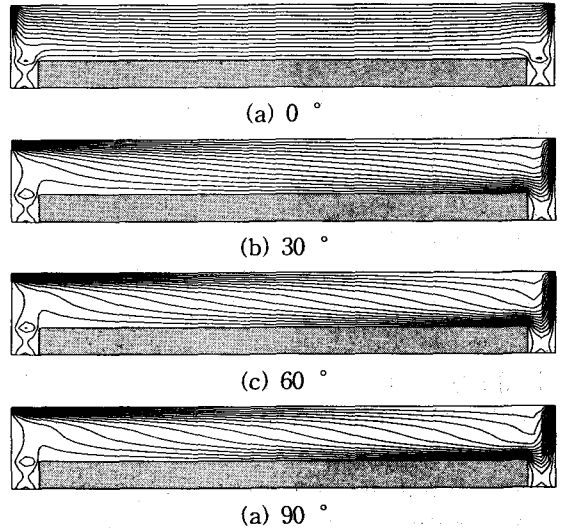


Fig. 2 Isotherms distributions with various tilt angle at $\Delta T = 20^\circ\text{C}$.

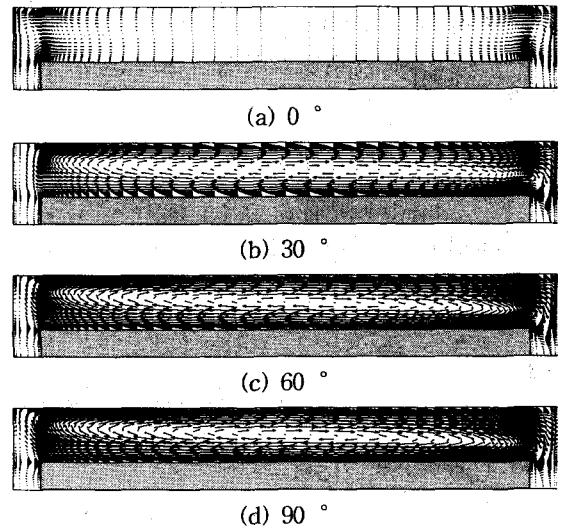


Fig. 3 Isotherms distributions with various tilt angle at $\Delta T = 60^\circ\text{C}$.

Fig. 5는 $\Delta T=60^{\circ}\text{C}$ 일 때 경사각도에 대한 속도벡터의 분포를 표시한 그림이다. 경사각도가 증가할수록 속도벡터도 더욱더 크게 형성되며 온도차가 커짐에 따라 작을 때보다도 동일한 경사각도에서 크게 분포됨을 알 수 있다. 이러한 등온선 및 속도벡터의 분포를 통해서 집열관의 경사각도가 증가할수록 집열관의 상부에서 집열관으로의 열전달이 활발하게 진행되고 있음을 알 수 있다.

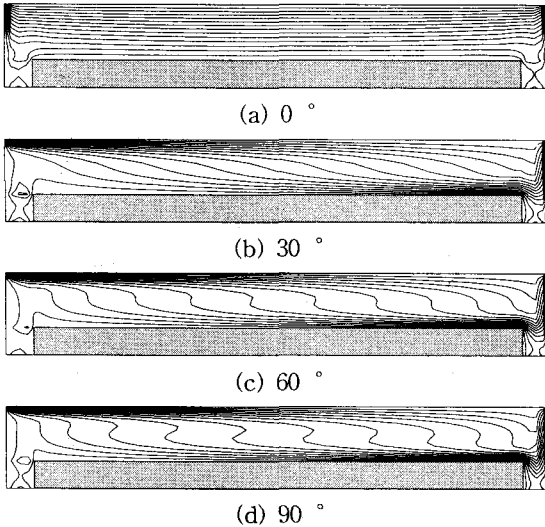


Fig. 4 Isotherms distributions with various tilt angle at $\Delta T=60^{\circ}\text{C}$.

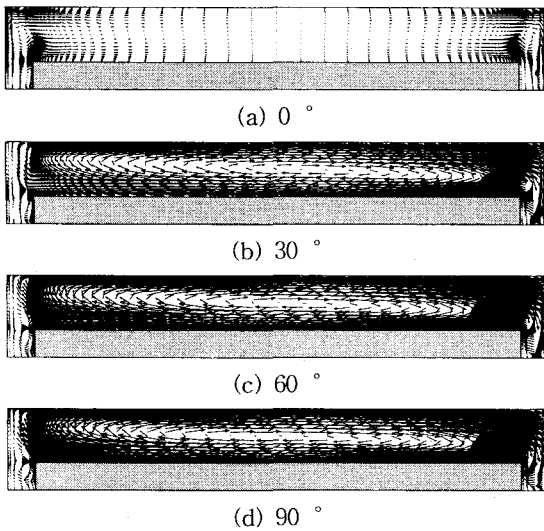


Fig. 5 Velocity vector distributions with various tilt angle at $\Delta T=60^{\circ}\text{C}$.

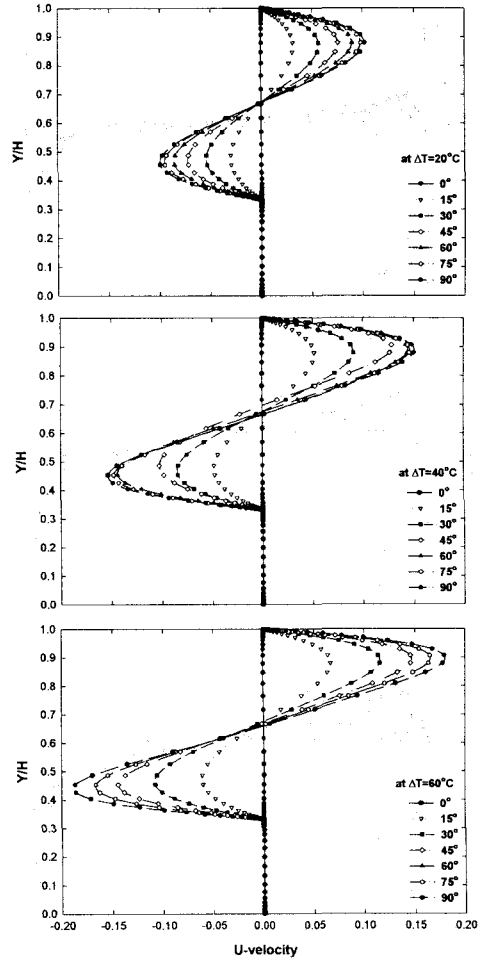


Fig. 6 U velocity distributions at $X/L=1/2$.

Fig. 6은 $X/L=1/2$ 인 단면에서 경사각도에 대한 U방향의 속도분포를 도시하였다. 경사각도가 0° 인 경우에는 속도가 거의 0이며, 경사각이 증가할수록 속도분포가 커지고 있음을 볼 수 있다. 그러나 경사각도가 약 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 사이에서는 그렇게 큰 변화는 일어나지 않는다. 또한 온도차가 증가할수록 단면에서의 속도분포도 증가하고 있어 온도차가 클수록 열전달이 잘 일어나고 있음을 알 수 있다. 그림에서 $Y/H=0.3$ 까지는 집열관이 있기 때문에 공기층에서의 속도는 0인 것이다.

Fig. 7은 $Y/H=1/3$ 인 단면에서 경사각도에 대한 V방향의 속도분포를 도시하였다. 경사각도가 증가할수록 단면에서의 속도분포도 증가함을 볼 수 있지만 왼쪽벽면에서 속도분포는 경사각도가 클 때

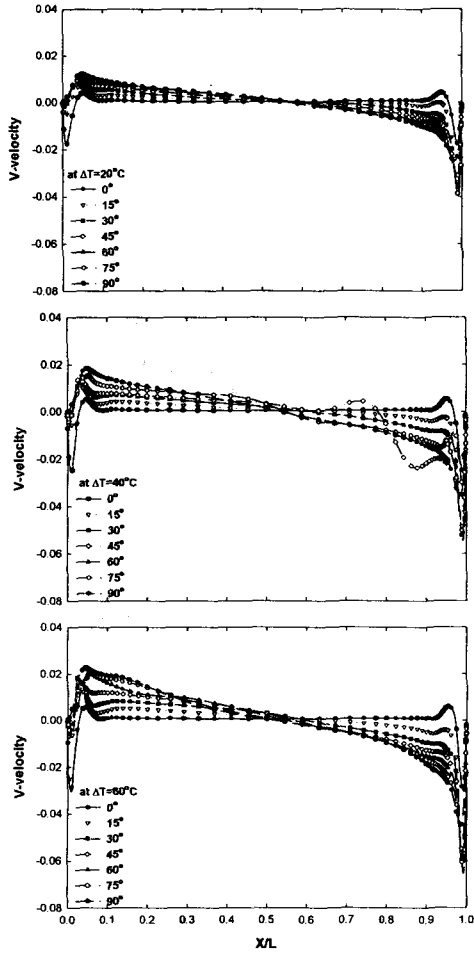


Fig. 7 V velocity distributions at $Y/H=1/3$.

보다는 0° 인 경우가 가장 높게 나타나고 있다. 이러한 현상은 공기층에서 경사각도의 증가에 따라서 발생하는 대류현상이 집열관의 왼쪽에서는 차가운 공기에 의해 벽면쪽으로 밀집되지 않고 상부로 바로 대류현상을 일으키기 때문이다. 그러나 단면의 오른쪽벽면에서는 대류의 영향으로 인해 경사각도가 커짐에 따라서 속도분포도 높게 형성되고 있음을 알 수 있다. U방향의 속도분포와 마찬가지로 경사각도가 약 $75^\circ \sim 90^\circ$ 사이에서는 변화의 폭이 매우 작다.

Fig. 8은 집열관의 표면에서 경사각도에 대한 국소누셀수의 분포를 표시한 그림이다. $\Delta T=20^\circ\text{C}$ 의 경우 경사각도가 0° 인 경우에는 X 의 길이 변화에 대하여 집열관의 상부표면에서

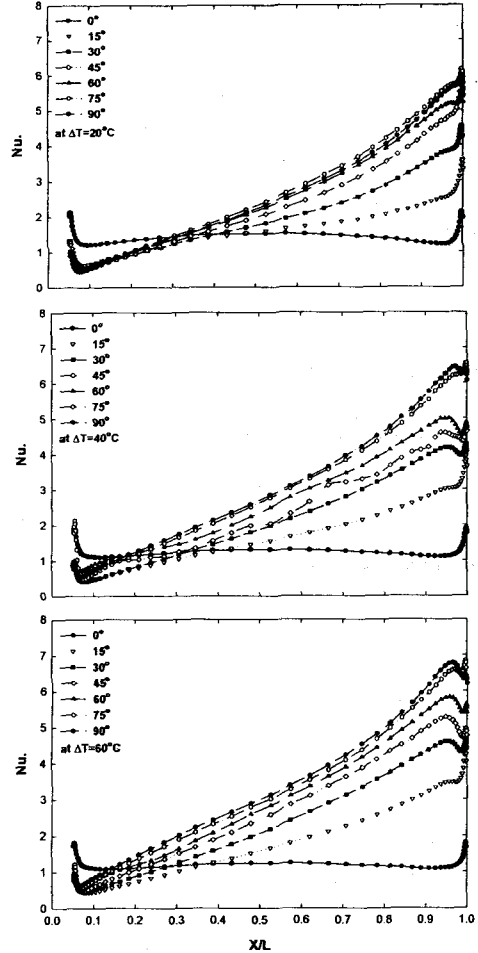


Fig. 8 Distributions of local Nusselt numbers at $Y/H=1/3$.

의 누셀수의 분포는 거의 변화가 없이 일정하다. 그러나 경사각과 X 의 길이가 증가할수록 누셀수의 분포도 증가하고 있으므로 경사각이 커질수록 열전달이 더욱더 잘 일어나고 있음을 알 수 있다. 또한 등온선 분포 및 속도분포에서 알수있듯이 경사각이 약 $75^\circ \sim 90^\circ$ 사이에서는 거의 같은 누셀수의 분포를 보이고 있다. 그러나 $X/L \approx 0.3$ 을 기점으로 하여 집열관의 왼쪽표면에서는 경사각이 증가할수록 누셀수의 분포가 낮아지는 것을 알 수 있는데 이것은 경사각의 증가에 의해서 가열된 공기는 상부쪽으로 밀집되고 차가운 유체는 하부쪽으로 밀집되기 때문에 나타나는 현상이다. 그리고 온도차가 증가할수록 이러한 현상을 보이는 X/L

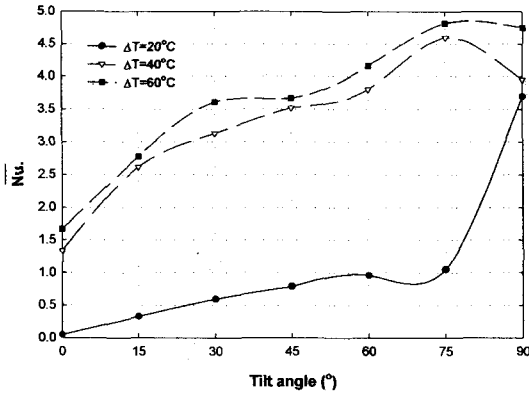


Fig. 9 Distributions of mean Nusselt number at various tilt angle.

의 거리는 좁아지고 있는 데 이것은 온도차가 클수록 경사각도에 대한 열전달이 더욱더 활발하게 일어나고 있음을 나타내는 것이다.

Fig. 9는 집열판의 경사각도에 대해 집열판의 상부 및 좌우벽면에서의 평균누셀수를 총합하여 총 평균누셀수를 구한 것이다. 이렇게 누셀수를 구한 이유는 집열판의 상부로부터 공기층을 통한 열전달이 집열판의 상부뿐만 아니라 좌우벽면에도 발생되기 때문이다. 온도차의 변화에 따라서 경사각도가 증가할수록 평균누셀수도 증가하고 있지만 경사각이 90°의 경우보다는 75°일 때가 평균누셀수의 분포가 가장 높게 나타나고 있다. 이것은 집열판의 경사각도가 75°이상이 되게 되면 공기층내의 가열된 공기가 대류에 의하여 집열판으로 열전달을 일으키는 것 보다는 집열판의 우측벽면쪽에 정체되어 있기 때문이다. 그러나 $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ 인 경우에 대해서는 경사각도가 90°일때가 열전달이 가장 높게 나타나고 있다.

4. 결 론

1. 경사각이 증가할수록 등온선 및 속도벡터는 집열판의 상부와 집열판의 상부벽면쪽으로 밀집된다.
2. 경사각이 증가할수록 집열판의 상부쪽으로 갈수록 열전달이 잘 일어난다.
3. $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ 인 경우에는 경사각이 90°인 경우 평균누셀수가 가장 높다.
4. $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$, 60°C 인 경우에는 집열판의 경사

각이 75°일 경우가 평균누셀수의 분포가 가장 높게 나타난다.

후기

본 연구는 해양수산부 수산특정연구개발사업비와 경상대학교 BK21지원에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 전운현, 1981, "태양열 집열기에 관하여", 태양에너지, 제1권, 제1호, pp.37~44
- (2) 강용혁, 양운섭, 1998, "태양열 이용기술 개발 현황", 태양에너지, Vol. 18, No. 2, pp.1~7
- (3) 모종근, 배철환, 정효민, 정한식, 1999, "vudvis형 태양열 집열판의 집열특성에 관한 연구", 대한기계학회, 춘계학술대회 논문집 B, pp.903~908
- (4) Ismail H., and Ozsabuncuoglu, 1995, "Economic analysis of flat plate collectors of solar energy", Energy Policy, Vol. 23, No. 9, pp.755~763
- (5) 김홍재, 1998, "평판형 집열기의 최적 설계를 위한 열성능 해석", 공기조화 냉동공학회, 하계학술발표회 논문집, pp.916~921
- (6) 이재현, 김석현, 정중화, 박만홍, 1992, "내부 발열유체를 가진 정사각 밀폐공간에서의 난류자연대류", 대한기계학회 논문집, 제16권, 제1h, pp.112~121
- (7) 이철재, 정효민, 정한식, 1998, "가열벽과 냉각벽을 갖는 사각공간내의 난류자연대류 수치해석", 공기조화 냉동공학회 논문집 pp.26~31
- (8) 정한식, 정효민, 김경근, 노승탁, 1999, "멤브레인형 LNG수송선 코파담내의 난류 자연대류", 대한기계학회집 B권, 제23권 제2호 pp.281~287
- (9) R. Cheesewright, K. J. King, and S. Ziai, 1986, "Experimental data of the Validation of Computer Codes for the Prediction of Two Dimensional Buoyancy Cavity Flow," Significant Questions in Buoyancy Affected Enclosure or Cavity Flows, ASME-HTD, pp.75~81
- (10) Suhas V. Patankar, 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow"