

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol.17. No.2, 1997

## 공기를 작동 유체로 하는 열다이오드의 열성능에 관한 실험적 연구

박이동\* · 장영근\*\* · 황인주\*\*\*

\* 성균관대학교 기계공학과

\*\* 성균관대학교 기계공학과 대학원

\*\*\* 한국건설기술 연구원

## An Experimental Study on the Thermal Performance of Air Filled Thermal Diode

Ee-Tong Pak\* · Young-Geun Jang\*\* · In-Ju Hwang\*\*

\* Dept. of Mech. Eng. Sung kyun Kwan University

\*\* Graduate school, Sung kyun Kwan University

\*\* Korea Institute of Construction Technology

### 요 약

열다이오드란 유체의 밀도차에 기인한 대류에 의하여 일방향성 열전달이 주로 일어나며 역방향의 열전달은 미미하도록 고안된 장치이다. 본연구에서는 실용적인 측면에서 평행사변형 형상과 직사각형 형상을 조합하고 좌우에 수직 평판을 설치하였으며, 내부 안내판을 가진 공기식 열다이오드를 제작하여 천이 및 정상상태에 관한 연구를 하였다.

공급된 열속에 따른  $Gr^*$ 는  $1.11 \times 10^{10} \sim 1.4 \times 10^{10}$  사이에 존재하였고 전체 실험 과정에 있어서  $Gr^*$  값은  $\pm 3\%$  이내로 유지되었다.  $Gr^*$ 의 증가에 따라  $Nu$ 값은 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며 guide vane의 유무와 유동통로의 깊이(channel depth)에 따라서는 민감한 경향을 보였다. 경사각의 변화에 따라 온도상태가 무차원시간 0.5~0.6 에서 나타나는 것으로 보아 시스템의 특성으로 본다.

## Abstract

Thermal diode is a device which allows heat to be transferred in one direction by convection due to difference of density of fluid, and blocks heat flow in the opposite direction. Vertical plate for heat collection and radiation are of utility for design of thermal diode. It was considered the transient and steady state of air filled thermal diode with guide vane which combined rectangular and parallelogrammic shape enclosures.  $Gr^*$  was kept constantly on  $1.11 \times 10^{10} \sim 1.4 \times 10^{10}$  and error range was  $\pm 3\%$  during the experiment.  $Nu$  was examined when inclined angle are  $15^\circ$  and  $45^\circ$  and, also the experiments was carried out with and without guide vane as well. Specially,  $Nu$  was linearly increased due to increase of  $Gr^*$ , and the effect of guide vane and dimensionless channel depth was sensitive. Developed state of temperature began at dimensionless time  $0.5 \sim 0.6$  due to variation of inclined angle, which is characteristic of system.

## 1. 서 론

열다이오드(thermal diode)란 유체의 밀도 차에 의한 대류 열전달 효과를 이용하여 일방향성(one way) 열전달이 주로 일어나고 역방향의 열전달은 미미하도록 고안된 장치이다.<sup>(1)</sup> 이러한 장치의 응용 분야로는 태양열 집열기, 풍조 시스템 등이 있으며, 그 기초 연구는 태양열 집열 시스템뿐만 아니라 액화가스 저장 탱크 등의 산업 및 공업 응용 분야에 널리 이용될 수 있다.

열다이오드의 연구에 있어서 열다이오드 내부 공간에서 작동 유체의 종류와 내부 공간의 기하학적 형상 그리고 유체의 흐름을 적절하게 분리 및 조절하는 안내판(guide vane)의 사용 등에 따른 유동특성 및 열전달 해석이 중요한 연구 과제라 할 수 있다.<sup>(2~10)</sup>

본연구에서는 공기를 작동 유체로 하는 열다이오드의 열성능에 영향을 미치는 인자들을 파악하는 데 연구 목적을 두었고 이러한 목적

을 달성하기 위하여 고안한 열다이오드는 열원부와 열방출부를 제외한 모든 부분을 단열한 밀폐 공간으로 구성되었으며 공기를 작동 유체로 사용하였다. 또한 관련 변수로는 크게 동적 인자로 열원부의 열속 변화, 기하학적 인자로 유동 통로의 경사각을  $15^\circ \sim 60^\circ$ 로, 기준 유동 경로 깊이에 대한 실유동 통로의 깊이의 비로 정의된 무차원 유동 통로의 깊이(dimensionless channel depth,  $d^*$ )를  $0.1 \sim 1$  까지 변화시켰다.

## 2. 열다이오드의 열전달 및 내부 유동 특성

### 2.1 열전달 및 내부 유동 특성

열다이오드 내부의 작동 유체는 고온부( $T_H$ )의 체적력과 기준 온도( $T_R$ ) 영역에서 체적력의 차이에 의해 안내판에 따라 형성된 열다이오드 내부의 loop를 따라 순환한다. 이러한 대류 현상은 열을 수반하게 되며, 유체는

방열부에서 열을 모형 Room으로 방열하고 하부 유동 통로를 따라 다시 방열부로 이동하는 순환 과정을 연속적으로 수행한다.<sup>(5, 8)</sup>

경사각에 따라 유동 형태는 Fig. 1 과 같이 single-global cell을 가지거나 여러개의 local cell을 가지게 되며, 총열전달에 있어서 global convective cell이 중요한 역할을 한다.

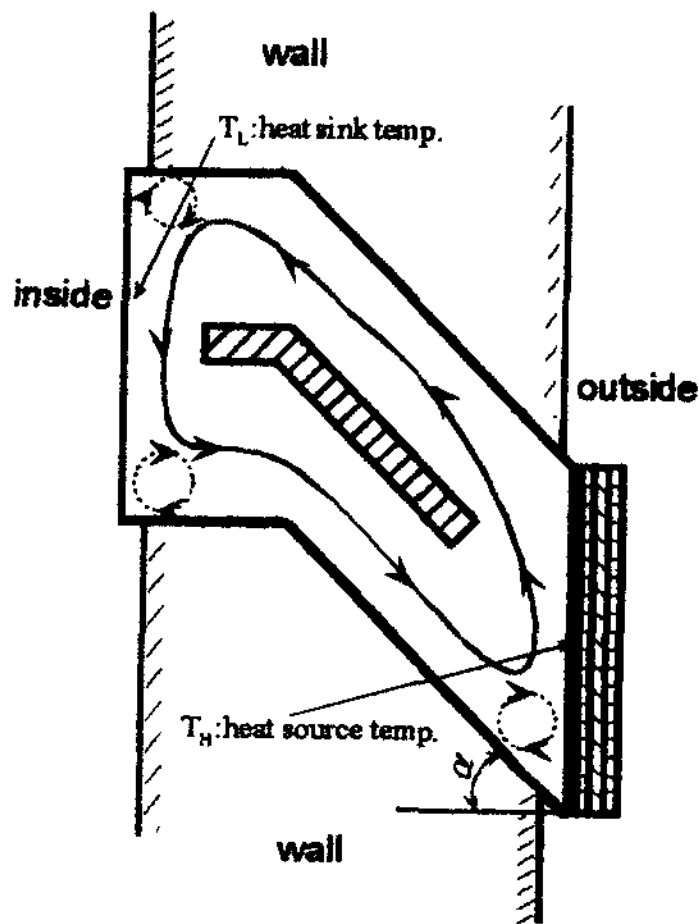


Fig. 1 Supposed flow pattern of Thermal diode

## 2.2. 관련 무차원수의 정의

본 연구에서 열다이오드의 성능을 비교 평가 하는 데 있어서 기본적인 무차원수인 Nusselt수를 이용하였으며, 동적인 인자로  $Gr^*$ 과 기하학적인 인자로서 경사각( $\alpha$ ), 무차원 유동 통로 깊이(dimensionless channel depth,  $d^*$ ) 등을 다음과 같이 정의하였다. 모든 물성치는 집열부와 방열부의 평균온도에서 구하였다.

$$Nu = \frac{q''}{\Delta T} \frac{H}{k}$$

$$Gr^* = \frac{g\beta q'' H^4}{k\nu^2}$$

$$d^* = \frac{d_x}{D}$$

Nu : Nusselt number

$Gr^*$  : modified Grashof number

$d^*$  : dimensionless channel depth

$d_x$  : variation of channel depth

D : reference channel depth due to inclined angle

H : characteristics length, m

g : gravitational acceleration,  $m/s^2$

h : heat transfer coefficient,  $W/m^2\cdot C$

$q''$  : heat flux,  $W/m^2$

k : thermal conductivity of air,  $W/m\cdot C$

$\beta$  : thermal expansion coefficient,  $K^{-1}$

$\nu$  : kinematic viscosity of air,  $m^2/s$

## 3. 실험 장치의 구성

열다이오드는 Fig. 2와 같이 아크릴판과 집열부 및 방열부의 동판으로 밀폐 공간을 형성하고 있으며 그 내부에 유체 흐름을 적절하게

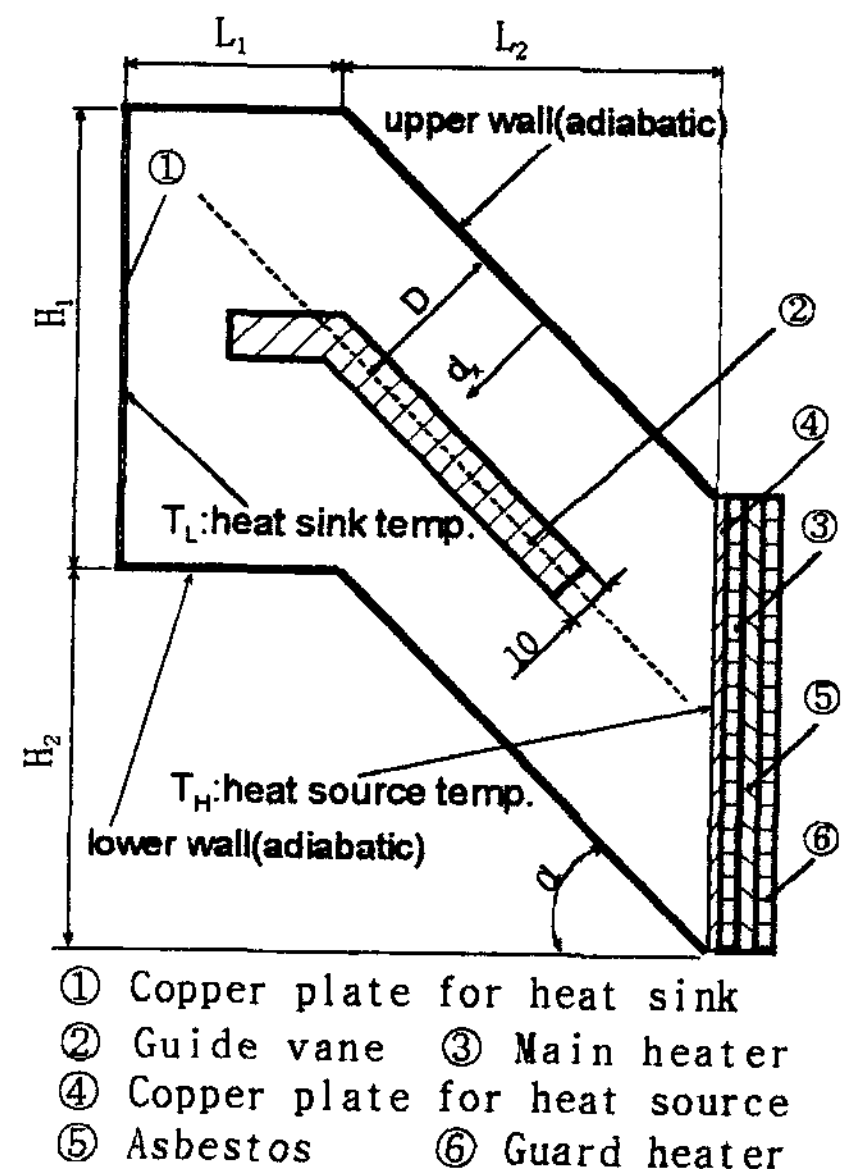


Fig. 2 Side view and components of thermal diode

제어할 수 있는 안내판(guide vane)이 설치되어 있다. 공기의 유동 통로가 되는 상하부판과 측면판은 강화 아크릴판으로 제작되었으며 유리면(glass wool, 10mm)과 스티로폴(styrofoam, 50mm)로 외부를 단열하였다. 방열부는 규격이 0.2mm×400mm×800mm인 동판(copper plate)으로 제작되었으며, 집열부는 5mm×400mm×800mm인 동판(copper plate)과 열속을 공급하기 위한 주가열기(main heater), 후방으로의 열손실을 막기 위한 석면판과 보조 가열기(guard heater)로 구성되어 있다.

방열부에 일정 온도 조건을 주기 위해 240cm×260cm×200cm인 공간을 스티로폴(styrofoam, 150mm)로 단열하여 Fig. 3처럼 모형 Room을 구성하였고 이 방열부가 노출된 열다이오드와 집열부의 열속을 변화시킬 수 있도록 구성된 전기 기기류, 데이터를 받아들이는 P.C., Data Acquisition(YOKOGAWA) 등이 있다.

유동 통로의 경사각에 따라  $\alpha=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 의 네 가지로 제작되었으며 상세 치수는 Table 1에 나타나 있다. 집열판과 방열판의 표면에 수직, 수평 중심선을 따라 각각 9개의 열전대를 부착하였으며 위치는 Fig. 3에 나타나 있다.

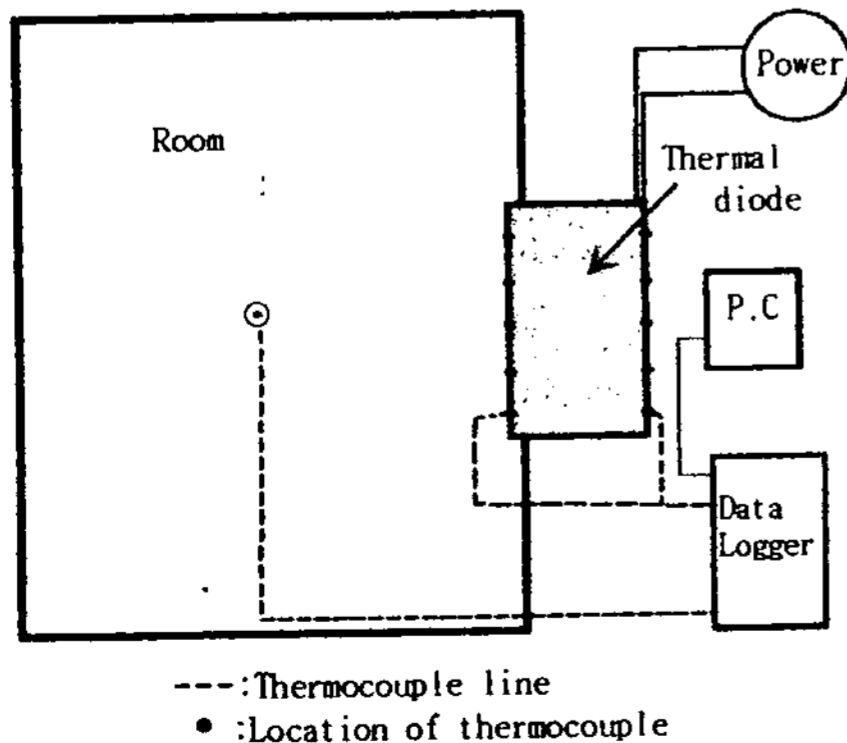


Fig. 3 Layout of apparatus (top view)

Table 1 Dimensions of thermal diode due to tilt angle

Sign \ $\alpha$	15°	30°	45°	60°	Remarks
H <sub>1</sub> (mm)	400				
H <sub>2</sub> (mm)	80	173	300	520	
L <sub>1</sub> (mm)	200				
L <sub>2</sub> (mm)	300				

#### 4. 실험 방법

먼저 열다이오드의 방열부가 일정한 온도를 유지하고 있는 모형 Room 내부에 노출되도록 설치한 후 모형 Room과 열다이오드의 초기 온도를 설정한다. 집열판에서 열원 공급을 간단히 하기 위해서 전기적인 가열기를 사용하였으며

일정 간격(본 실험에서는 15분 간격)으로 집열판과 방열판의 온도 확립 구간 또는 Nu값의 변화가 없는 구간의 온도를 측정하여 실험을 종료하며 경사각  $\alpha=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 변화시키면서 반복한다. 내부 안내판의 영향을 알아보기 위하여 안내판의 두께를 변화에 의한 무차원 유동 통로의 깊이(dimensionless channel depth,  $d^*$ )를 0.1~1까지 변화시키면서 반복 실험한다.

#### 5. 실험 결과 및 고찰

##### 5.1 열속의 영향

실험 조건에 따라 공급된 열속은 일정하였으며, 이에 따른  $Gr^*$ 는  $1.11 \times 10^{10} \sim 1.4 \times 10^{10}$  사이에 존재하였고  $Gr^*$ 의 증가에 따라 Nu값은 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

## 5.2 무차원 통로 깊이의 영향

Fig. 4 ~ Fig. 7에서 알 수 있듯이 guide vane이 없는 경우( $d^*=1$ )에는 작은 경사각인  $15^\circ$  근처에서 우수한 열전달 성능을 보였고, guide vane이 설치된 경우에는 각 경사각별로 다음과 같은  $d^*$  범위에서 우수한 열전달 성능을 보였다.

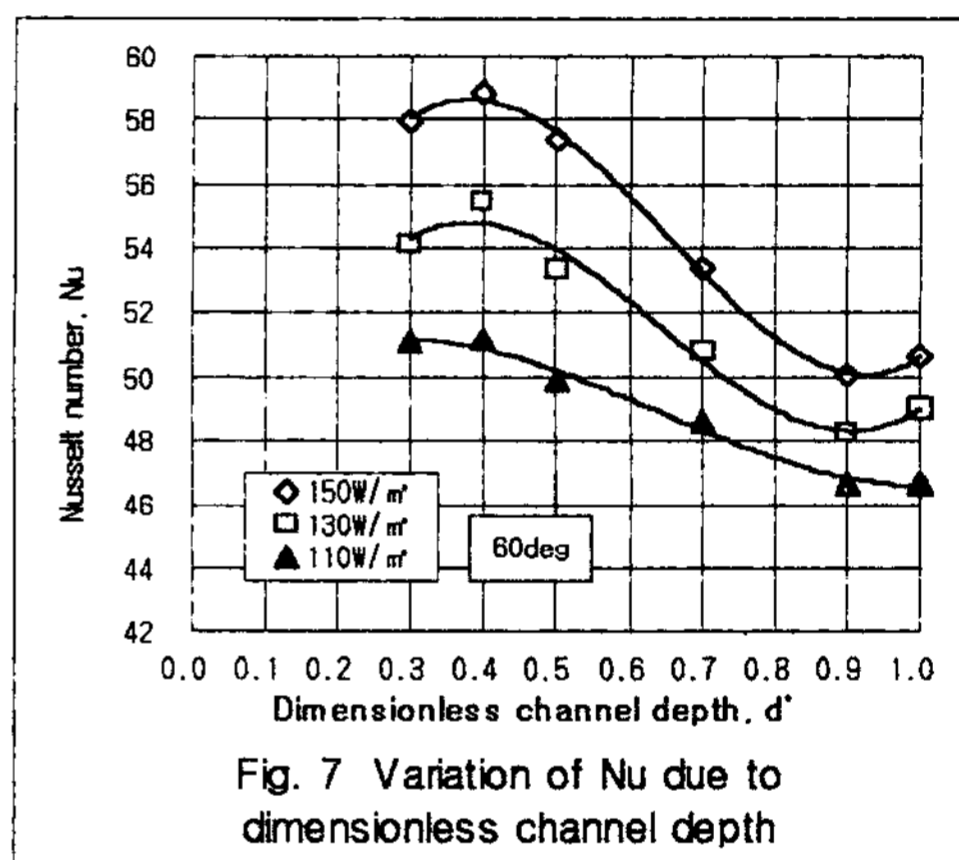
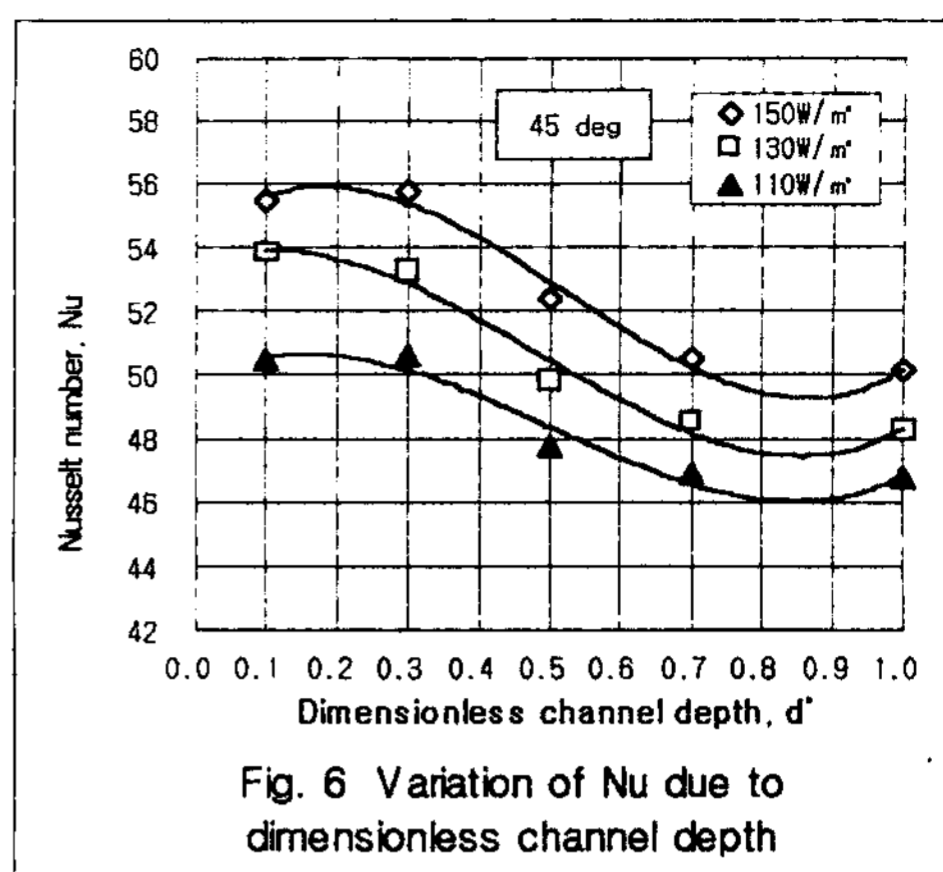
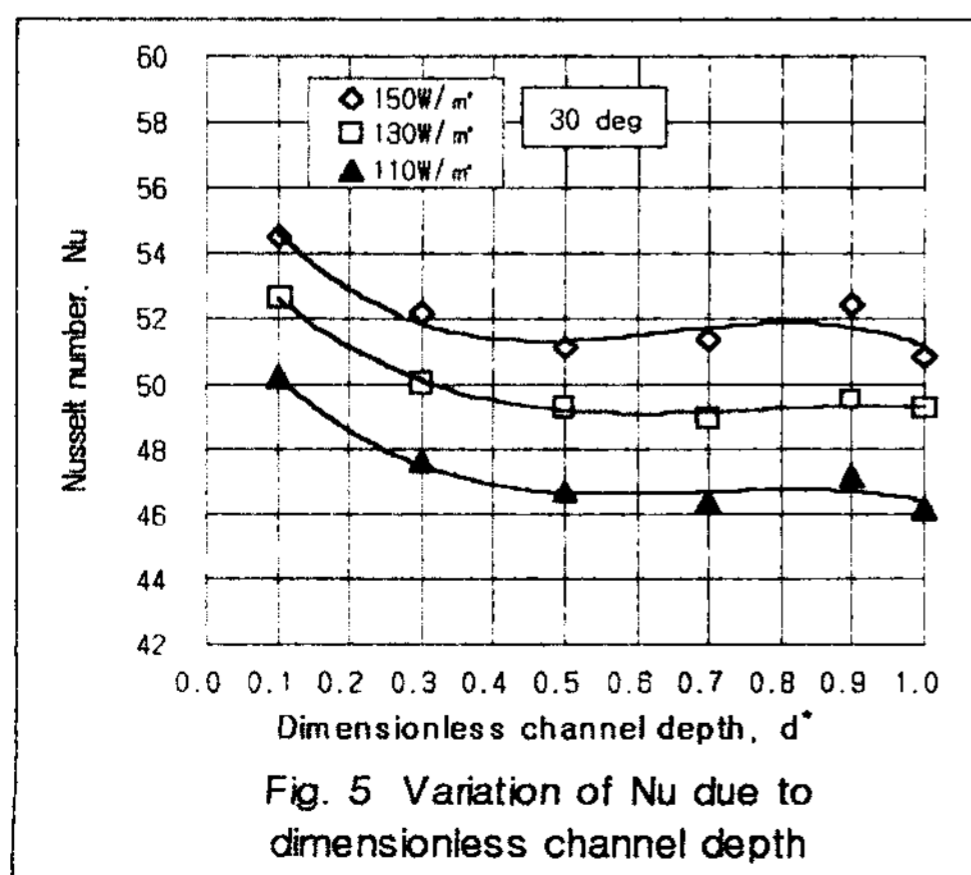
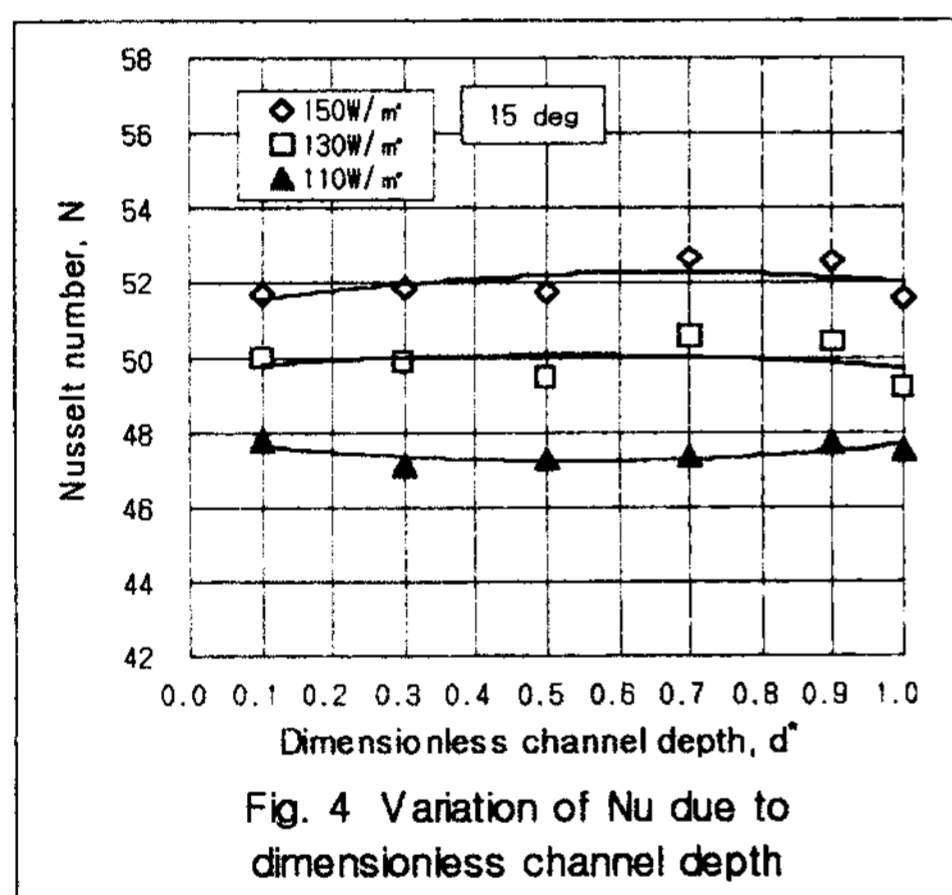
$15^\circ$  :  $d^* = 0.6 \sim 0.9$

$30^\circ$  :  $d^* = 0.1$

$45^\circ$  :  $d^* = 0.1 \sim 0.5$

$60^\circ$  :  $d^* = 0.2 \sim 0.6$

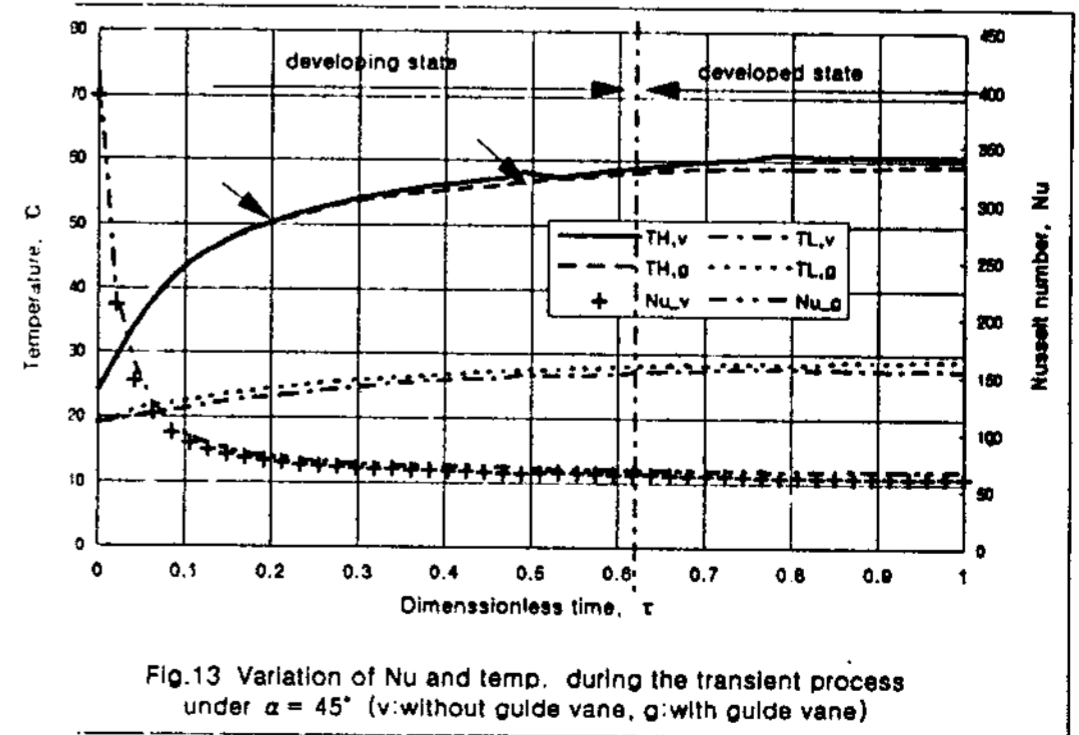
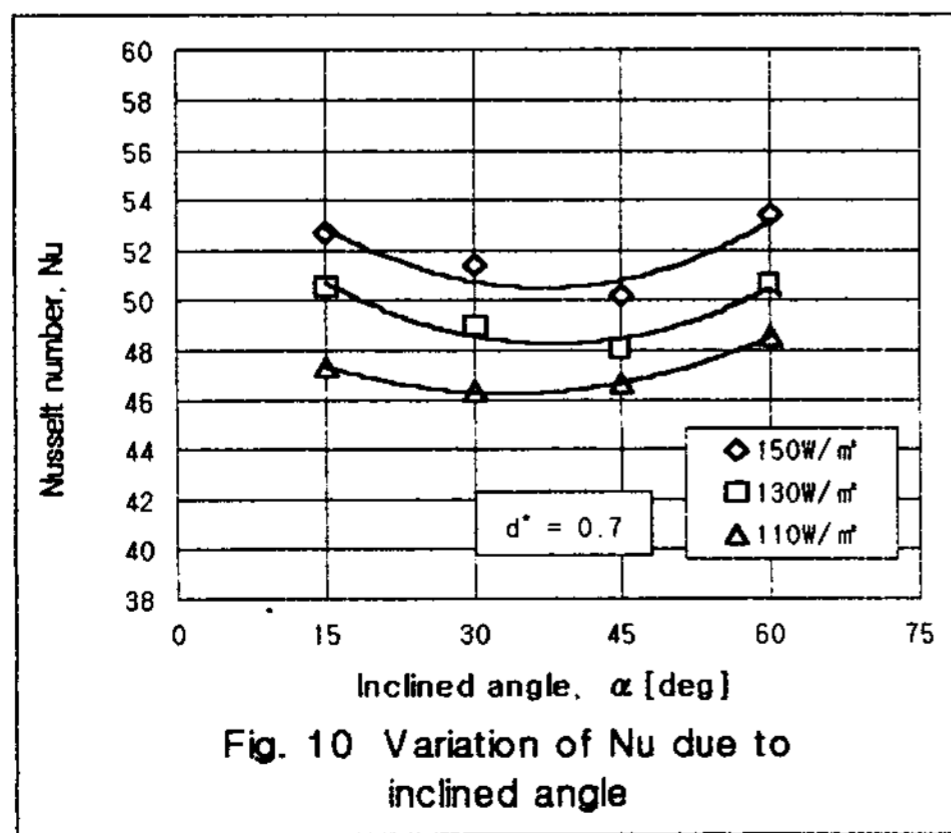
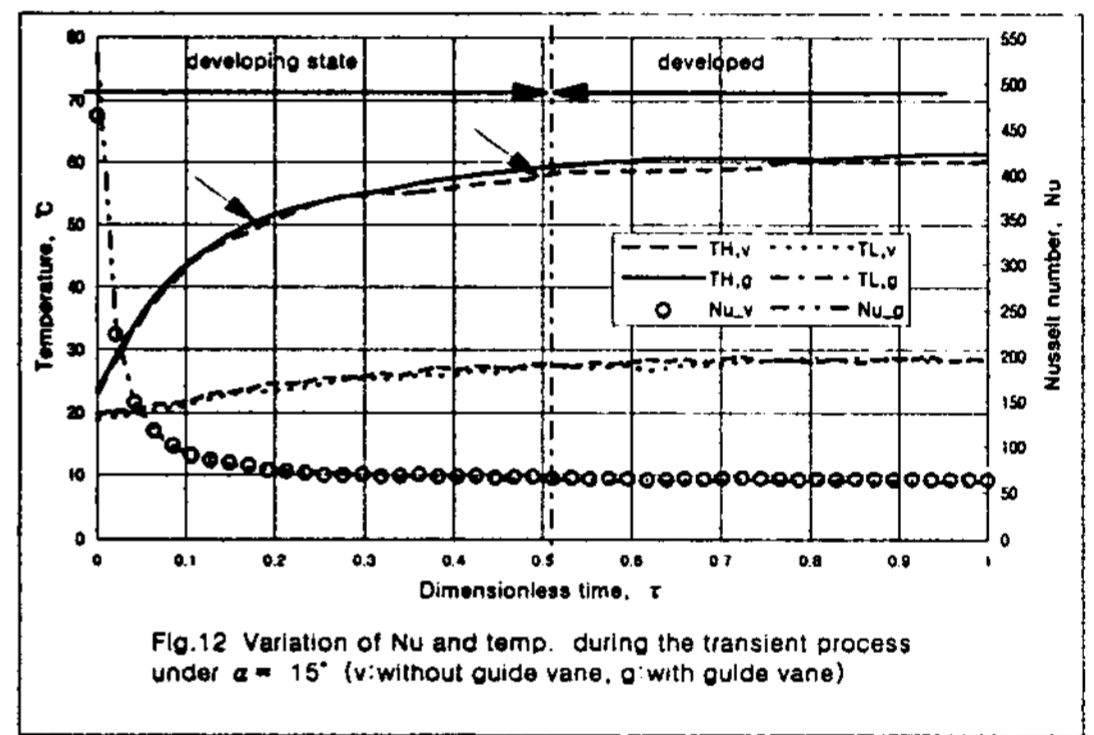
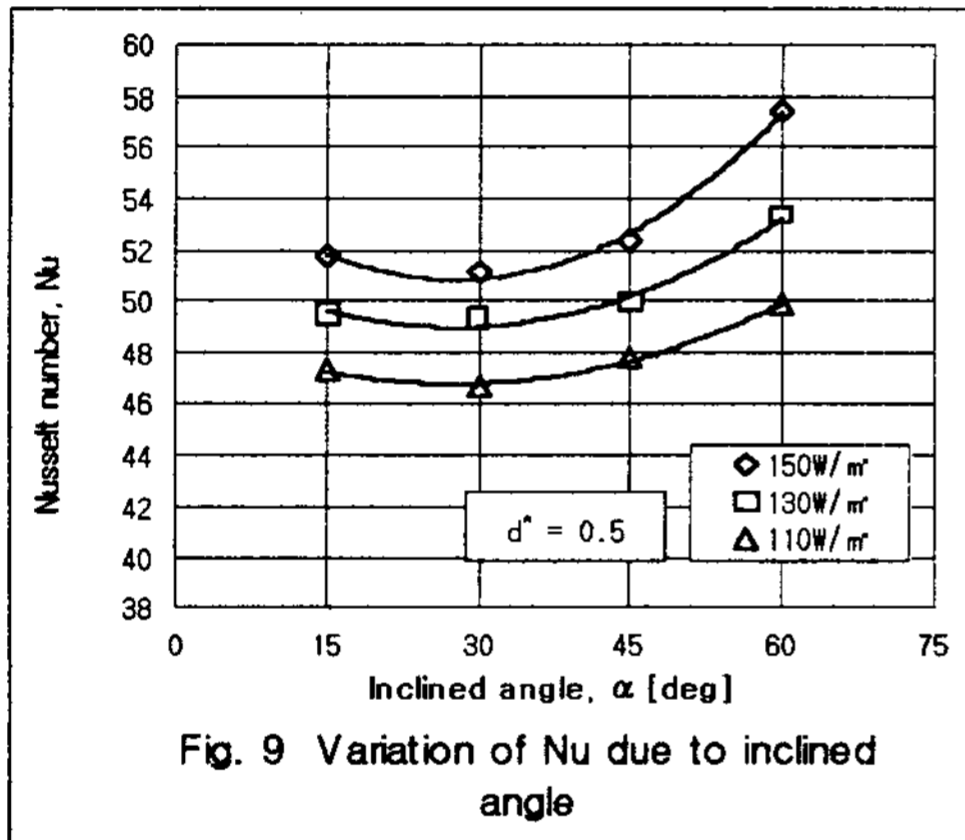
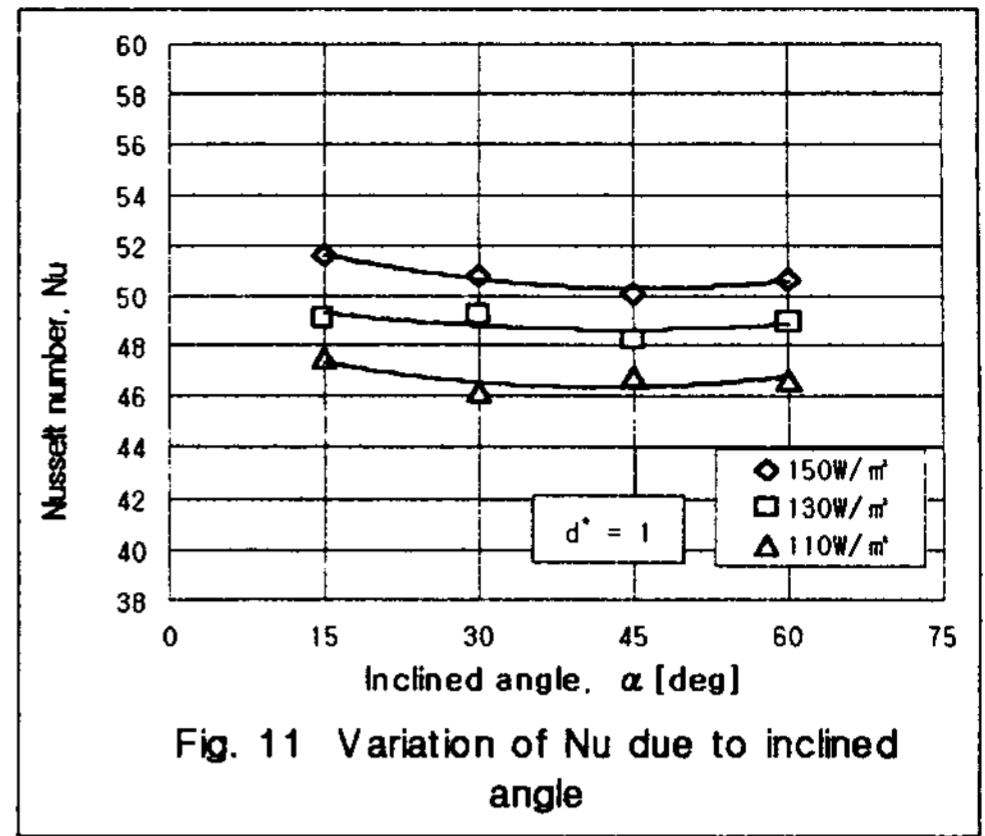
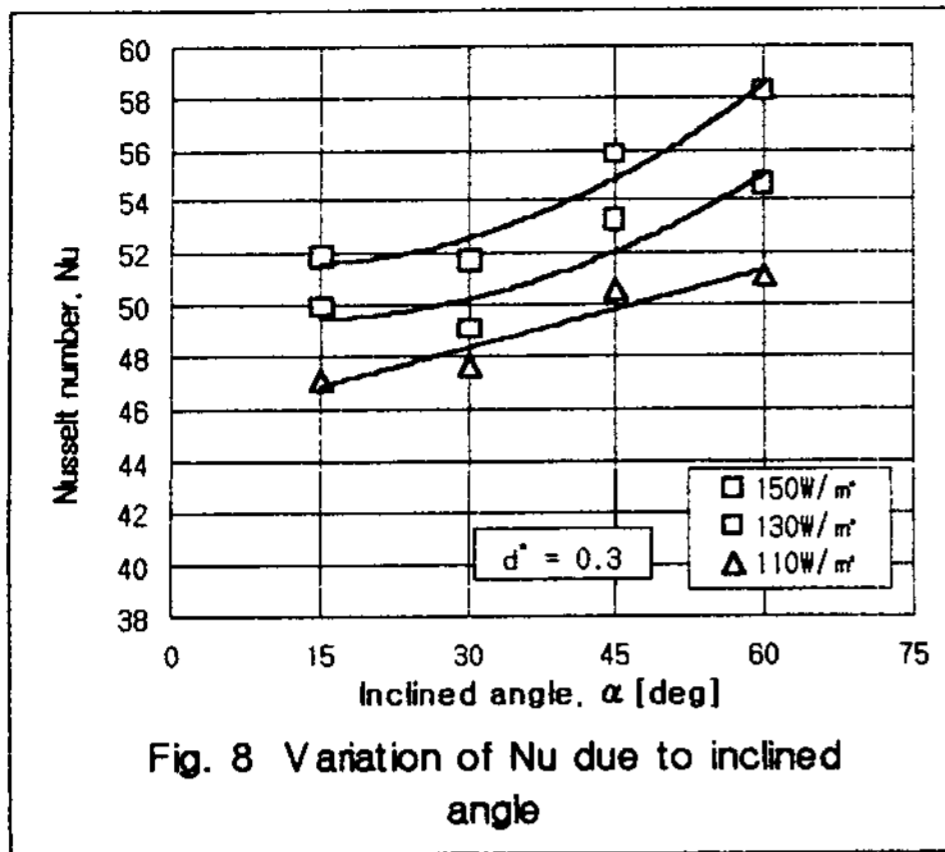
### \* Figures



## 5.3 경사각의 영향

Fig. 8 ~ Fig. 11에서 guide vane이 없는 경우, 즉  $d^*=1$ 인 경우에는 경사각  $45^\circ$  근처에서 최저의 열전달 성능을 보이고 경사각이 각각  $15^\circ$ ,  $60^\circ$  방향으로 진행함에 따라 Nu 값은 증가하여 완만한 포물선을 형태의 경향을 가졌다.

guide vane이 있는 경우에는  $d^*$ 가 0.9에서 0.1로 감소함에 따라 포물선의 최저 극점이 점차적으로  $45^\circ$  에서,  $30^\circ$  부근으로 이동함을 볼 수 있다. 이 극점을 기준으로 경사각이  $15^\circ$ ,  $60^\circ$  방향으로 진행함에 따라 Nu값이 guide vane이 없는 경우에 비해 급격히 증가함을 볼 수 있다.



천이과정에 관한 실험에서 확립된 온도구간까지 걸리는 무차원시간은 0.5~0.6으로 나타났다으며, 경사각에 의해서만 변화하였고 그 결과는 Fig. 12, Fig. 13에 나타나 있다

## 6. 결론

천이 과정에서 최초로 확립된 온도 영역까지 걸리는 무차원 시간은 경사각에만 의존하므로 본시스템의 특성으로 볼 수 있으며 모든 경사각에 대하여  $Gr^*$ 의 증가에 따라  $Nu$ 가 선형적으로 증가하므로 집열부 열속은 충분히 커야 한다.

경사각  $15^\circ$  를 제외한 모든 경사각에서 안내판(guide vane)이 설치된 경우가 더 유리하고  $d^*$ 가 0.1 ~ 0.5 일 때 높은 열전달 성능을 보인다.

경사각의 영향을 나타내는 포물선의 최저 극점이  $30^\circ$  와  $45^\circ$  부근에서 존재하므로 상향 벡터 요소가 최대가 되는 경사각을 선택할 필요가 있다.

향후 후속 연구로 기하학적인 형상비의 변화와 역방향에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## 참고 문헌

1. K. Chen, 1988, "Design of a plane-type bidirectional thermal diode", J. of Solar Energy Engineering, Vol. 110, p.p.299~305
2. J. N. Arnold, I. Catton, D. K. Edwards, 1967, "Experimental investigation of natural convection in inclined rectangular regions of differing aspect ratios", J. of Heat Transfer, p.p. 67~71
3. S. J. M. Linthorst, W. M. M. Schinkel, C. J. Hoogendoorn, 1981, "Flow structure with natural convection in inclined air filled enclosures", J. of Heat Transfer, Vol. 103, p.p. 535~539
4. K. C. Chung, L. M. Trefethen, 1982, "Natural convection in a vertical stack of inclined parallelogrammic cavities", J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 25, No. 2, p.p. 277~284
5. N. Seki, S. Fukusako, A. Yamaguchi, 1983, "An experimental study of free convective heat transfer in a parallelogrammic enclosure", J. of Heat Transfer, Vol. 105, p.p. 433~439
6. S. Kimura, A. Bejan, 1984, "The boundary layer natural convection regime in a rectangular cavity with uniform heat flux from the side", J. of Heat Transfer, Vol. 106, p.p. 98~103
7. F. J. Hamady, J. R. Lloyd, H. Q. Yang, K. T. Yang, 1989, "Study of local natural convection heat transfer in a inclined enclosure", J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 32, No. 9, p.p.1697~1708
8. E. Ramos, A. Castrejon, 1990, "Natural convection in a two-dimensional square loop", J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 33, No. 5, p.p. 917~930
9. G. S. H. Lock, D. Ladoon, 1993, "Natural convection in the cranked thermosyphon", J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 36, No. 1, p.p. 177~182
10. 천원기, K. Chen, 이태규, 김형택, 1994,

“Loop형 Thermal Diode의 열성능에 관한  
기초 연구”, 태양 에너지, Vol. 14, No. 3,  
p.p.55~60

11. 한국 태양에너지 학회, 1991, 태양 에너지  
핸드북



# An Experimental Study on the Thermal Performance of Air Filled Thermal Diode

Ee-Tong Pak\* · Young-Geun Jang\*\* · In-Ju Hwang\*\*

\* Dept. of Mech. Eng. Sung kyun Kwan University

\*\* Graduate school, Sung kyun Kwan University

\*\* Korea Institute of Construction Technology

## Abstract

Thermal diode is a device which allows heat to be transferred in one direction by convection due to difference of density of fluid, and blocks heat flow in the opposite direction. Vertical plate for heat collection and radiation are of utility for design of thermal diode. It was considered the transient and steady state of air filled thermal diode with guide vane which combined rectangular and parallelogrammic shape enclosures.  $Gr^*$  was kept constantly on  $1.11 \times 10^{10} \sim 1.4 \times 10^{10}$  and error range was  $\pm 3\%$  during the experiment.  $Nu$  was examined when inclined angle are  $15^\circ$  and  $45^\circ$  and, also the experiments was carried out with and without guide vane as well. Specially,  $Nu$  was linearly increased due to increase of  $Gr^*$ , and the effect of guide vane and dimensionless channel depth was sensitive. Developed state of temperature began at dimensionless time 0.5~0.6 due to variation of inclined angle, which is characteristic of system.