

공기를 작동 유체로 하는 열다이오드의 천이 과정중 열성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Thermal Performance of Air Filled Thermal Diode during Transient Process

황인주*, 장영근(성균관대 원), 박이동, 김철주(성균관대)

Abstract

Thermal diode is a device which allows heat to be transferred in one direction by convection due to difference of density of fluid. Vertical plate for heat collection and radiation are of utility for design of thermal diode.

It was considered the transient process of air filled thermal diode with guide vane which combined rectangular and parallelogrammic shape enclosures. Gr^* was kept constantly on 1.06×10^{10} and error range was $\pm 2\%$ during the experiment. Nu was examined when inclined angle are 15° and 45° and, also the experiments was carried out with and without guide vane as well. Specially, The effect of guide vane was sensitive. Developed region of temperature began at dimensionless time $0.5 \sim 0.6$ due to variation of inclined angle, which is characteristic of system.

1. 서론

밀폐공간이나 열다이오드(thermal diode)에 관한 대부분의 선행연구들은 일정 온도 또는 정상 상태하에서 수행되었으며, 천이 또는 일정 열속 조건에 관한 연구는 미진한 상태이다.

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 필요하다.^(2~7)

본실험에서는 일정 열속 조건하에서 공기를 작동 유체로 하는 열다이오드의 천이과정동안 내부 안내판의 영향과 천이 특성을 파악하는 데 연구 목적을 두었고 이러한 목적을 달성하기 위하여 고안한 열다이오드는 열원부와 열방출부를 제외한 모든 부분을 단열한 밀폐 공간으로 구성되었으며 공기를 작동 유체로 사용하였다.

열다이오드(thermal diode)란 유체의 밀도차에 의한 대류 열전달 효과를 이용하여 일방향성(one way) 열전달이 주로 일어나도록 고안된 장치이다.⁽¹⁾ 이러한 장치의 응용 분야로는 태양열 집열기, 공조 시스템 등이 있다.

2. 내부 유동 특성과 무차원수

열다이오드 내부의 작동 유체는 고온부(T_H)의 체적력과 기준 온도(T_R) 영역에서 체적력의 차이에 의해 안내판에 따라 형성된 열다이오드 내부의 loop를 따

라 순환한다. 이러한 대류 현상은 열을 수반하게 되며, 유체는 방열부에서 열을 모형 Room으로 방열하고 하부 유동 통로를 따라 다시 방열부로 이동하는 순환 과정을 연속적으로 수행한다.^(1~6)

열다이오드 내부의 기하학적인 형상과 동적 인자에 따라 유동 형태는 Fig. 1 과 같이 single-global cell을 가지거나 여러개의 local cell을 가질 수 있으며, 총 열전달에 있어서 global-convective cell의 역할이 매우 중요하다.

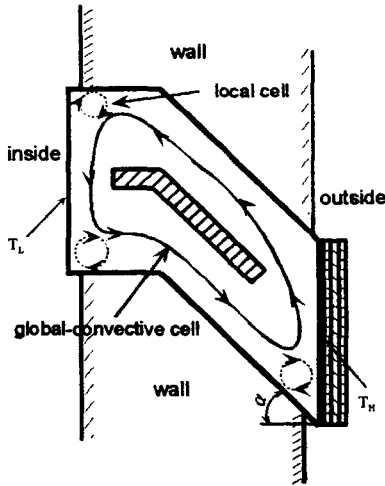


Fig. 1 Supposed flow pattern of Thermal diode

본 연구에서 열다이오드의 천이과정과 열 성능을 비교 평가 하는 데 있어서 기본적인 무차원수로 Nusselt수를 이용하였으며, 무차원 시간과 무차원 통로깊이를 다음과 같이 정의하였다. 모든 물성치는 집열부와 방열부의 평균온도에서 구하였다.

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

$$\tau = \frac{t}{t_e}, \quad d^* = \frac{d_x}{D}$$

Nu : Nusselt number

q'' : heat flux, W/m²

d^* : dimensionless channel depth

d_x : variation of channel depth

D : reference channel depth due to inclined angle t_e : final time, min

H : characteristics length, m

k : thermal conductivity of air, W/m°C

τ : dimensionless time

t : measured time, min

3. 실험 장치

주요한 실험 장치로는 단열된 모형Room에 방열부가 노출된 열다이오드와 집열부의 열속을 공급할 수 있도록 구성된 전기 기기류, 데이터를 받아들이는 P.C., Data Acquisition(YOKOGAWA) 등이 있다. 열다이오드의 단면도와 전체적인 평면 구성도는 각각 Fig. 2 과 Fig. 3에 나타나 있다

3.1 열다이오드

열다이오드는 Fig. 2와 같이 아크릴판과 집열부 및 방열부의 동판으로 밀폐 공간을 형성하고 있으며 그 내부에 유체 흐름을 적절하게 제어할 수 있는 안내판(guide vane)이 설치되어 있다.

공기의 유동 통로가 되는 상하부판과 측면판은 강화 아크릴판으로 제작되었으며 유리면(glass wool, 10mm)과 스티로폼(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.

유동 통로의 경사각에 따른 상세 치수는 Table 1에 나타나 있다.

3.2 모형 Room

방열부에 일정 온도 조건을 주기 위해 240cm×260cm×200cm인 공간을 스티로 폴(styrofoam, 150mm)로 단열하여 Fig. 3처럼 모형 Room을 구성하였다.

Table 1 Dimensions of thermal diode due to tilt angle

Sign	α	15°	45°	Remarks
H (mm)		400		
H ₁ (mm)		80	300	
L ₁ (mm)		200		
L ₂ (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 사용하였다.

일정 간격으로 집열판과 방열판의 온도 확립 구간 또는 Nu 값의 변화가 없는 구간까지의 온도를 측정하여 실험을 종료하며 각 경사각과 안내판의 유무에 대하여 반복한다. 일정 열속 조건에서 천이 과정에 대한 해석의 편의를 위하여 시간에 따른 집·방열부의 온도구배가 일정한 경우를 확립된 온도구간이라고 정의하였다.

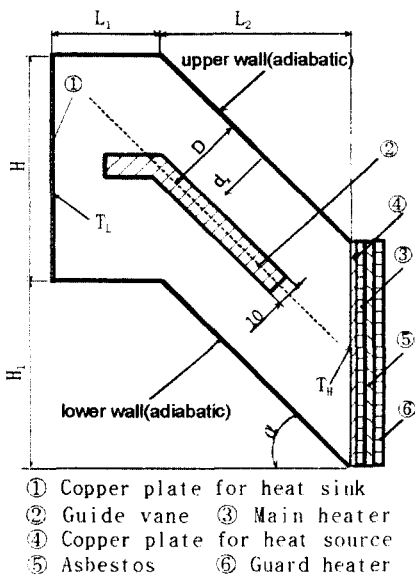


Fig. 2 Side view and components of thermal diode

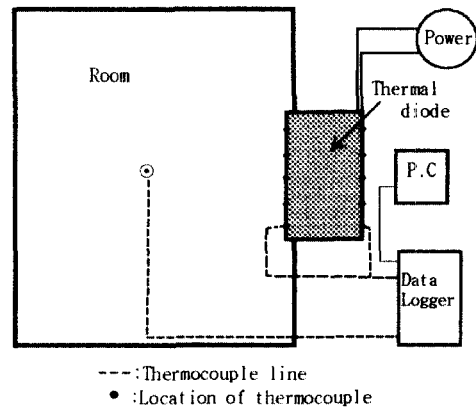


Fig. 3 Layout of apparatus (top view)

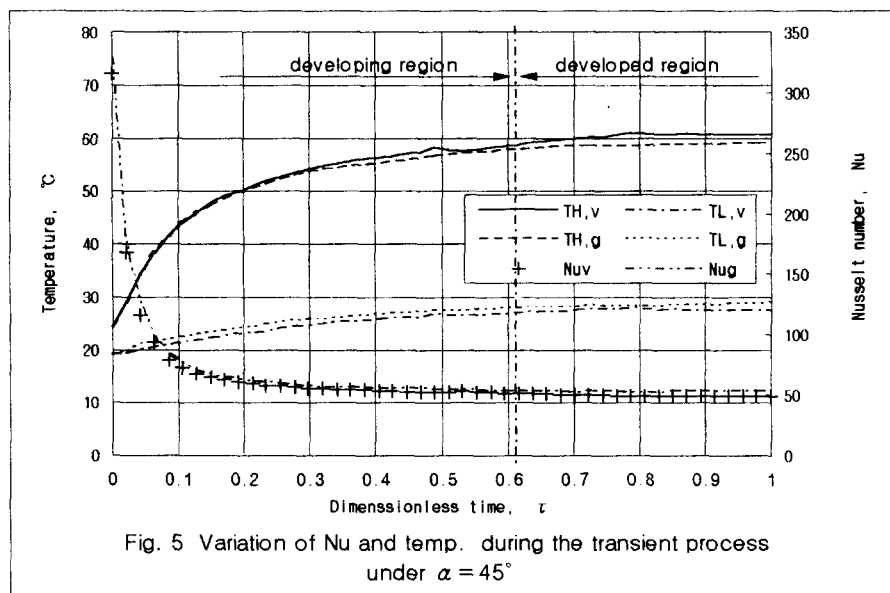
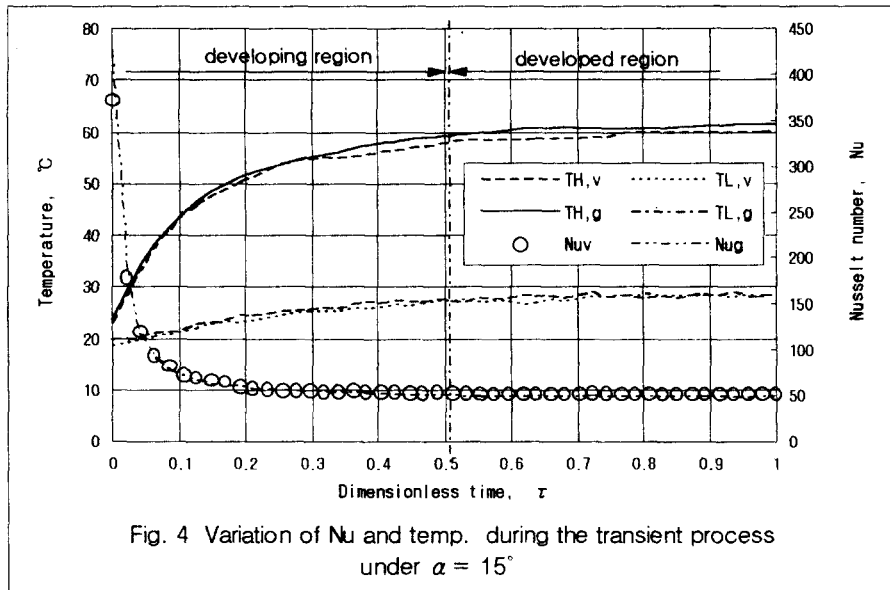
5. 실험 결과 및 고찰

실험 조건에 따라 공급된 열속에 따른 Gr*값은 1.06×10^{10} 로 일정하였으며, 이에 따른 오차는 전체 실험 과정에 있어서 $\pm 2\%$ 이내로 유지되었다.

Fig. 4, Fig. 5에 무차원 시간의 경과에 따른 집·방열부의 온도 변화와

Nu값의 변화가 도시되어 있으며, 본 시스템에서는 경사각의 변화에 의해서만 최초 확립된 온도영역이 변하였으며, 경사각이 15° 일 때 무차원 시간 0.5에서 확립된 온도영역을 보였고 45° 에서는 0.6에서 확립되었다. 이는 시스템의 특성으로 보인다. 경사각 15° 에서는 안내판의 영향이 크게 나타나지 않았으나 45° 에서는 안내판의 영향이 분명하게 나타남을 볼 수 있었다.

안내판(guide vane)이 있는 경우에 비해 안내판(guide vane)이 없을 경우 Nu값이 상당히 감소함을 볼 수 있는데, 이는 상부 유체와 하부 유체 사이의 전도 및 대류에 의한 열교환, 유체와 유체 사이의 점성 등에 의하여 집열부의 고온 유체가 방열부로 자연스럽게 이동하지 못하고 local cell등의 생성에 기인하여 열저항이 커지기 때문이다.



6. 결 론

본 실험에서 유동 통로의 경사각(α)에 따라 안내판의 영향이 분명히 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 천이과정중 확립된 온도영역을 무차원 시간으로 구분함으로써 변수에 따른 시스템의 특성들을 비교할 수 있다. 경사각에 의한 영향은 부력의 상향 벡터 요소의 변화에 기인한 것으로 판단되며, 실험 결과 여러 인자들의 복합적인 상관 관계는 전도에 대한 대류 유동 열전달비로 정의된 $Nu = f(Gr^*, \alpha, d^* \dots)$ 의 함수 관계로 표시할 수 있음을 알았다. 정확한 함수 관계를 파악하기 위한 후속 연구로 다양한 경사각($\alpha = 0^\circ \sim 60^\circ$)과 무차원 유동 통로의 깊이(d^*)를 0.1~1까지 변화시킴에 따른 연구가 진행되고 있다.

* 참고문헌

1. K. Chen, 1988, "Design of a plane-type bidirectional thermal diode", J. of Solar Energy Engineering, Vol. 110, p.p.299~305
2. 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
3. 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
4. G. N. Ivey, 1984, "Experiment on transient natural convection in a cavity", J. of Fluid Mechanics, Vol. 144, p.p. 389~401
5. 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
6. 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
7. 천원기, K. Chen, 이태규, 김형택, 1994, "Loop형 Thermal Diode의 열성능에 관한 기초 연구", 태양 에너지, Vol. 14, No. 3, p.p.55~60