

# 열다이오드식 밀폐공간의 열傳達 特性에 關한 實驗的 研究

장 영 근<sup>†</sup>, 김 석 현<sup>\*</sup>

<sup>†</sup> 국민대학교 자동차공학전문대학원, <sup>\*</sup> 국민대학교 기계공학과

## An Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Thermal Diode Type Enclosure Cavity

Yeong-Keun Jang<sup>†</sup>, Suk-Hyun Kim<sup>\*</sup>

<sup>†</sup> Department of Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

<sup>\*</sup> Department of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received May 3, 2000; revision received October 23, 2000)

**ABSTRACT:** Thermal diode is a device which allows heat to be transferred in one direction by convection due to density difference of fluid, and blocks heat flow in the opposite direction. It is simple in construction and low in cost. And so, it is used as heat collection system of solar energy. In order to acquire a basic design data, thermal diode heat collection system has been studied experimentally for flux Rayleigh numbers from  $2 \times 10^8$  to  $8 \times 10^8$ . The heat transfer rate of this system is shown 10~47% higher than that of other earlier research results. The correlation obtained in this study is  $Nu = 0.0037(Ra^*)^{0.429} (d^*)^{0.05} \left(\frac{Lr}{H}\right)^{0.0415}$ .

**Key words:** Thermal diode(열다이오드), Heat source(집열부), Heat sink(방열부), Guide vane(안내판), Dimensionless channel depth(무차원 유동통로깊이)

### 기 호 설 명

$A$  : 열전달 면적 [ $m^2$ ]  
 $A_r$  : 열다이오드 형상비,  $Lr/H$   
 $D$  : 기준 유동통로 중심선깊이 [m]  
 $d^*$  : 무차원 유동통로깊이,  $d_x/D$   
 $d_x$  : 실제 유동통로깊이 [m]  
 $H$  : 방열판 높이 [m]  
 $Gr$  : Grashof 수,  $g\beta\Delta TL^3/\nu^2$   
 $g$  : 중력가속도 [ $m/s^2$ ]  
 $h$  : 열전달계수 [ $W/m^2\text{ }^\circ C$ ]

$k$  : 열전도계수 [ $W/m\text{ }^\circ C$ ]  
 $L$  : 열다이오드 길이 [m]  
 $Lr$  : 열다이오드 직육면체부 길이 [m]  
 $Nu$  : Nusselt 수,  $hL/k$   
 $q$  : 공급열속 [ $W/m^2$ ]  
 $Pr$  : Prandtl 수,  $\nu/\alpha$   
 $Ra^*$  : 플릭스 Rayleigh 수, 식(5)  
 $W$  : 직육면체 폭 [m], 식(1)

### 그리스 문자

$\alpha$  : 열확산계수 [ $m^2/s$ ]  
 $\beta$  : 열팽창계수 [ $1/K$ ]  
 $\Delta T$  : 방열부와 흡열부의 평균온도차 [ $^\circ C$ ]  
 $\theta$  : 경사각,  $\pi\phi/180$  [radians]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4818; fax: +82-2-910-4718

E-mail address: ykjang@kmu.kookmin.ac.kr

$\nu$  : 동점성계수 [ $m^2/s$ ]

$\phi$  : 경사각 [ $^\circ$ ]

## 1. 서 론

에너지 사용기기의 고효율화, 에너지 절약기술의 실용화 및 에너지 저소비형 산업의 육성 등이 선진국을 중심으로 강력하게 추진되고 있다. 이러한 세계적 에너지 이용경향에 발맞추어 기존의 화석에너지 절약 및 효율적 이용과 화석에너지가 가지고 있는 문제점들을 해결할 수 있는 신·재생에너지의 개발이 활발히 진행되고 있는 중이다.<sup>(1)</sup>

우리나라에서도 여러 가지 신·재생에너지들에 관한 연구가 진행 중에 있는데 그중에서 에너지의 무한함, 깨끗함, 무공해인 태양에너지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 태양에너지는 주·야간 및 기상변화에 따라 간헐적이다. 따라서 태양에너지의 간헐성을 해결하기 위하여 태양열을 저장하여 이용하는 축열시스템이 많이 연구 개발되어 왔다. 그러나 축열시스템은 태양열을 저장할 수 있는 저장용적이 커야 하고 저장조의 부식, 동절기 작동유체 순환계통의 동과 위험성 및 초기 설비 투자비가 크기 때문에 비경제적이다.<sup>(2)</sup>

따라서 상기 문제점들을 효과적으로 보완하고 태양열 이용의 극대화를 위해서는 고효율 집열 성능을 가지며 설치 및 유지보수가 간단하고 비용이 저렴한 열다이오드식 집열시스템 개발이 필요하다. 열다이오드식 집열시스템은 주 열전달 메커니즘이 자연대류로서 열을 한쪽 방향으로만 흐르게 하고 반대 방향으로 열흐름을 차단하는 장치이다.<sup>(6,7,8)</sup>

이것을 건물벽에 설치하여 영구적으로 건물난방 및 단열재로 이용할 수 있다면 공기조화 측면에서 난방부하를 감소시켜 화석에너지를 이용한 열공급량을 줄일 수 있고, 태양에너지를 효율적으로 이용할 수 있기 때문에 열다이오드를 이용하는 집열시스템 및 solar wall 등에 관한 연구가 최근에 활발히 진행되고 있다.

이러한 연구는 Eckert and Calson,<sup>(3)</sup> Turner and Flack<sup>(4)</sup> 및 Seki et al.<sup>(5)</sup>의 밀폐공간 내에서의 형상비 변화에 따른 자연대류 열전달 효과에서 시작되었다. 본격적으로 Chen<sup>(6,7)</sup>이 수직 집열

판 및 수직 방열판과 유체가 채워진 몇 개의 루프로 구성된 열다이오드 실험에서 관련 인자의 변화에 따라 열전달률을 평가하였으며 경사각이 수직기준  $70^\circ \sim 90^\circ$  사이에서 최대 열전달률을 얻을 수 있음을 보였다. 본 연구에서는 기존의 단순 밀폐공간 내의 열전달 특성에 관한 연구들과는 다르게 단순 직육면체형과 평행육면체형을 조합한 열다이오드식 복합 밀폐공간을 만들어서 복합 밀폐공간 내의 열전달 특성을 파악하였다.

연구목적은 건물 공조시스템의 난방부하를 줄이고 에너지 이용을 효율적으로 하기 위한 보다 간단하고 경제적인 새로운 열다이오드식 집열시스템의 성능 개선에 필요한 기초 설계자료를 제시하는 것이다.

이와 같은 연구목적을 달성하기 위하여 열다이오드식 복합 밀폐공간 상·하부의 온도, 내부유동통로깊이, 공급열유속, 경사각 및 형상비 등을 변화시키며 실험하여 열전달 특성을 파악하였다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 열다이오드

열다이오드는 열을 한쪽 방향으로만 흐르게 하고 반대 방향으로의 열전달은 미미하도록 고안된 장치로 열전달의 방향성이 반도체 다이오드와 유사하여 열다이오드라 불린다. 주 열전달 메커니즘은 자연대류로서 열전달의 방향성을 가지고 태양열을 집열하여 건물 난방에 이용한다.

열다이오드는 설치형태와 열흐름의 방향성에 따라 크게 정방향과 역방향 열다이오드로 나눈다.

설치형태에 따른 구분은 집열부와 방열부의 위치에 따라서 결정된다. 집열부가 방열부보다 하부에 설치되어 있는 것을 정방향 열다이오드라고 하고 집열부가 방열부보다 상부에 설치되어 있는 것을 역방향 열다이오드라고 한다. 설치형태가 정방향인 것은 겨울철 주간엔 태양열을 집열하여 실내 난방에 이용할 수 있고 야간에는 실내의 고온이 외부로 방출되는 것을 차단하는 단열재 역할을 한다.

또한 설치형태가 역방향인 것은 여름철에 이용할 수 있는 것으로 주간에는 고온의 태양열이 실내로 전달되지 못하도록 단열재의 역할을 하고 야간에는 실내의 고온을 실외의 저온부로 방출시

켜 실내 냉방효과를 얻을 수 있다.

열흐름의 방향성에 따른 구분은 열다이오드의 주 열전달 메커니즘인 자연대류가 발생하는 경우에는 정방향 열다이오드이고, 고온부가 저온부보다 상부에 위치하여 자연대류가 미미하게 발생하는 경우에는 역방향 열다이오드라고 한다.

## 2.2 관련 방정식 및 무차원수

### 2.2.1 관련 방정식

Eckert and Calson<sup>(3)</sup>은 직육면체형 밀폐공간 내에서의 형상비( $W/H$ ) 변화에 대한 국소 열전달계수를 다음과 같이 구했다.

$$Nu_w = 1 + 0.00166 \left( \frac{W}{H} \right) \cdot Gr_w^{0.9} \quad (1)$$

여기서  $Gr_w = g\beta\Delta TW^3/\nu^2$  이다.

Turner and Flack<sup>(4)</sup>은 직육면체형 밀폐공간에서 한쪽의 모든 수직벽은 고온으로 일정하게 유지되고 반대 벽은 집중된 냉각부를 가지고 있을 때 집중 냉각부 변화에 따른 자연대류 열전달 상관관계식을 다음과 같이 구하였다.

$$Nu = 0.524Gr^{0.26} \quad (2)$$

여기서  $Gr = g\beta\Delta TH^3/\nu^2$  이다.

Seki et al.<sup>(5)</sup>은 평행육면체형 밀폐공간에서 좌우 수직 평판을 일정 온도 조건으로 유지하고 중간 연결통로를 단열시키고 작동매체로 공기를 사용하여 경사각을 변화시켰을 때 자연대류 열전달 상관관계식을 다음과 같이 구하여 평행육면체형 밀폐공간에서 적용할 수 있음을 밝혔다.

$$Nu = 0.218F(\theta) Pr^{0.024} Ra^{1/4} \quad (3)$$

$$F(\theta) = 1 + 0.546\theta - 0.781\theta^2$$

여기서  $\theta = \pi\phi/180 (0^\circ \leq \phi \leq 70^\circ)$ 이고,

$$Ra = g\beta\Delta TW^3/\nu k \text{ 이다.}$$

### 2.2.2 관련 무차원수

열다이오드 집열시스템의 정상상태 열전달 성능을 비교 평가하는 데 사용되는 무차원수인 Nusselt

수는 공급열유속인자로 플렉스 Rayleigh 수( $Ra^*$ )와 기하학적 인자로서 경사각( $\phi$ ), 무차원 유동통로깊이( $d^*$ ) 및 열다이오드 형상비( $Lp/H, Lr/H$ ) 등에 영향을 받으므로 다음과 같은 함수관계로 나타낼 수 있다.

$$Nu = f(Ra^*, \phi, d^*, Lp/H, Lr/H) \quad (4)$$

본 연구에서는 식(4)에서와 같은 실험변수들 중 경사각  $60^\circ$ , 열다이오드 평행육면체부 형상비를 나타내는  $Lp/H$ 를 0.75로 고정시키고 나머지 변수들과 Nusselt 수와의 상관관계식을 도출하였다.

식(4)에 표시된 플렉스 Rayleigh 수는 실험조건이 균일 벽 열유속 조건인 경우에 적용하는 Rayleigh 수로 유동장에서 부력의 영향이 지배적인 자연대류의 경우에 적용되는 무차원수이다. 균일 열유속 조건의 수정된 플렉스 Rayleigh 수는 다음과 같다.

$$Ra^* = \frac{g\beta q_w L^4}{avk} \quad (5)$$

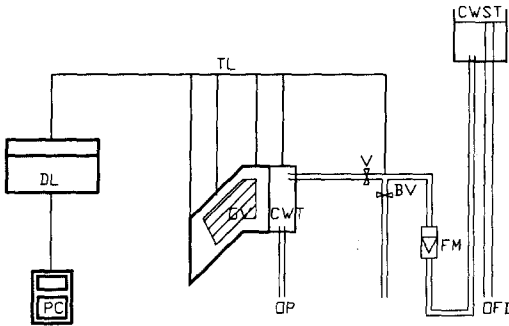
위 식에서 공기에 대한 각 물성값들은 집열부 고온벽과 방열부 저온벽의 평균온도를 가지고 계산하였고 평균온도는 집·방열부에 각각 상하(7개), 좌우(2개) 대칭으로 9개의 T형 열전대를 설치하여 측정 한 온도값을 가지고 구하였다.

또한 무차원수의 특성길이는 길이 변화에 따라 열전달에 미치는 효과를 파악하기 위하여 900 mm로 고정시킨 열다이오드 수직방향 길이 대신에 직육면체부 길이 변화에 따라 변하는 수평방향 길이  $L$ 을 사용하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

주요 실험장치로는 수냉각 장치( $800L \times 10W \times 400H, 3.2 l$ ), 수냉각 장치에 방열부가 노출된 열다이오드, 집열부의 열유속을 변화시킬 수 있도록 구성된 전기 기기류, 데이터를 받아들이는 P.C., Data Acquisition(YOKOGAWA사) 등이 있으며, 수냉각 장치를 설치한 실험장치의 개략도



BV: Bypass Valve DL: Data Logger  
 CWST: Cooling Water Supply Tank  
 CWT: Cooling Water Tank FM: Flow Meter  
 GV: Guide Vane OFD: Over Flow Drain  
 OP: Outlet Port PC: Personal Computer  
 TL: Thermocouple Line V: Valve

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

와 열다이오드의 구성요소단면도가 Fig. 1과 Fig. 2에 나타나 있다.

열다이오드는 직육면체형과 평행육면체형을 조합하여 아크릴판과 동판으로 밀폐공간을 형성하고 내부에 유체흐름을 제어할 수 있는 안내판(guide vane)이 설치되어 있다. 공기의 유동 통로는 강화 아크릴판으로 제작되었으며, 유리섬유(10 mm)와 폴리스티렌 폼(50 mm)으로 외부를 단열하였다.

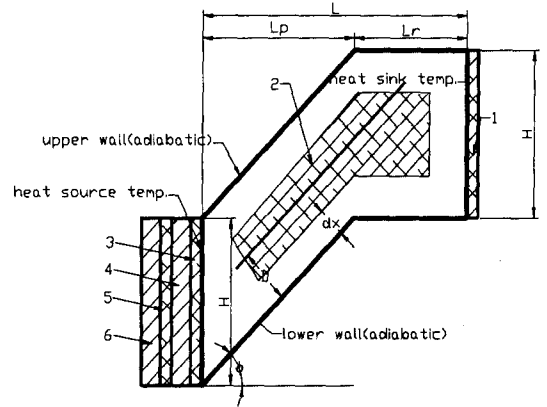
방열부(0.2 mm×400 mm×800 mm)와 집열부(5 mm×400 mm×800 mm)는 동판으로 제작했고 일정 열유속을 공급하기 위한 주 가열기와 후방으로의 열손실을 막기 위한 석면판과 보조 가열기로 구성하였다.

집열판과 방열판의 표면에 수직, 수평 중심선을 따라 각각 9개의 열전대를 부착하였다.

3.2 실험방법

열전달 특성을 파악하기 위하여 수냉각 장치를 저온 방열부에 설치하고 냉각수를 일정한 유량(1 LPM)으로 흘려 보내면서 실험하였다.

집열판에서 열원 공급을 간단히 하기 위해서 전기적인 가열기를 사용하였으며, 이때 공급되는 열유속은 경기도 수원 지역에서 집열판의 경사각이 90°일 때 겨울철 일사량에 집열기의 효율을



1 Copper plate for heat sink 4 Main heater  
 2 Guide vane 5 Asbestos  
 3 Copper plate for heat source 6 Auxiliary heater

Fig. 2 A cross sectional view and components of thermal diode.

고려하여 일정 열유속을 각각 100 W/m<sup>2</sup>에서 250 W/m<sup>2</sup>으로 변화시켰다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 플렉스 Rayleigh 수 변화에 따른 영향

Fig. 3은 경사각이 60°이고, 무차원 유동통로깊이가 1.0으로 열다이오드 내부에 안내판을 설치하지 않은 경우에 플렉스 Rayleigh 수 변화에 따른 Nusselt 수의 변화를 서로 다른 형상비에 대하여 나타낸 그림이다.

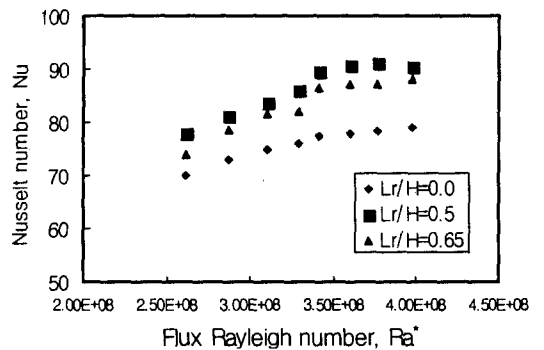


Fig. 3 Variation of Nu due to Ra\* with different aspect ratio for φ=60° and d\*=1.0.

그림에서와 같이 플럭스 Rayleigh 수가 증가할 수록 집열부에서 발생한 부력이 열다이오드 내의 점성력보다 크게 되어 Nusselt 수가 증가하는 것을 볼 수 있다.

또한 형상비인  $Lr/H$ 가 0.65보다는 0.5로 직육면체의 길이가 작은 경우의 Nusselt 수가 높게 나타나고 있다. 그리고 플럭스 Rayleigh 수가  $3.50 \times 10^8$ 까지는 Nusselt 수의 증가율이 크지만 그 이상에서는 완만하게 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다.

4.2 경사각 변화에 따른 영향

Fig. 4는 무차원 유동통로깊이가 0.5이고, 형상비인  $Lr/H$ 가 0.5로 단순 직육면체형과 평행육면체형을 조합한 복합 밀폐공간을 가지는 열다이오드의 경우 경사각 변화에 대한 Nusselt 수의 변화를 서로 다른 플럭스 Rayleigh 수에 대하여 나타낸 것이다. 앞에서와 같이 플럭스 Rayleigh 수가 증가할수록 Nusselt 수가 크게 나타나고 있다. 증가율은 경사각이 클수록 더 크게 나타나고 있다. 그리고 전반적으로 경사각이 증가할수록 Nusselt 수가 완만하게 상승하고 있다. 이것은 경사각이 증가할수록 집열부에서 방열부로의 부력 상승에 의한 추진력(driving force)이 증가하였기 때문이다.

4.3 무차원 유동통로깊이의 영향

Fig. 5, Fig. 6에서 알 수 있듯이 경사각이  $15^\circ$ 로 작은 경우에는 밀폐공간 내부유동통로깊이 변화에 상관없이 일정한 열전달 성능을 보였다. 그러나 경사각이  $60^\circ$ 로 커지게 되면 내부유동통로깊이 변화에 따른 열전달 성능 변화가 뚜렷하다. 특히 경사각이  $60^\circ$ 로 큰 경우에 무차원 유동통로깊이가 0.5~0.7로 내부유동통로의 폭이 어느 정도 클 때 Nusselt 수가 높게 나타났다.

따라서 경사각이 클수록 밀폐공간 내부에 안내판을 설치하여 고온 상승유체와 저온 하강유체를 분리하는 것이 우수한 열전달 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4.4 형상비 변화에 따른 영향

Fig. 7은 형상비 변화에 대한 Nusselt 수의 변

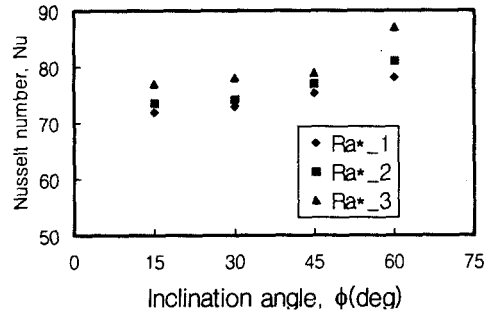


Fig. 4 Variation of Nu due to inclination angle with different  $Ra^*$  for  $d^*=0.5$  and  $A_r=0.5$  ( $Ra^*_1=2.62 \times 10^8$ ,  $Ra^*_2=2.88 \times 10^8$ ,  $Ra^*_3=3.12 \times 10^8$ ).

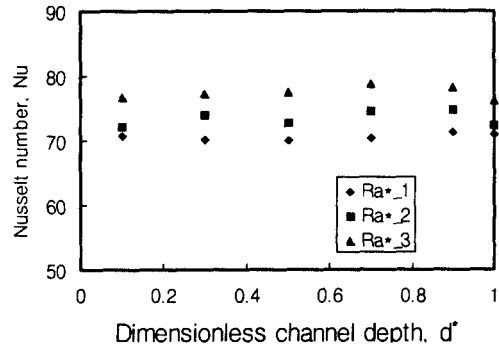


Fig. 5 Variation of Nu due to  $d^*$  with different  $Ra^*$  for  $\phi=15^\circ$  and  $A_r=0.5$  ( $Ra^*_1=2.62 \times 10^8$ ,  $Ra^*_2=2.88 \times 10^8$ ,  $Ra^*_3=3.12 \times 10^8$ ).

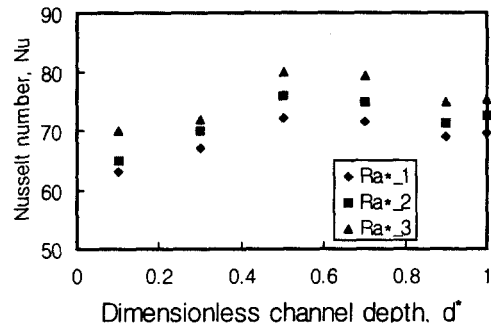


Fig. 6 Variation of Nu due to  $d^*$  with different  $Ra^*$  for  $\phi=60^\circ$  and  $A_r=0.5$  ( $Ra^*_1=2.62 \times 10^8$ ,  $Ra^*_2=2.88 \times 10^8$ ,  $Ra^*_3=3.12 \times 10^8$ ).

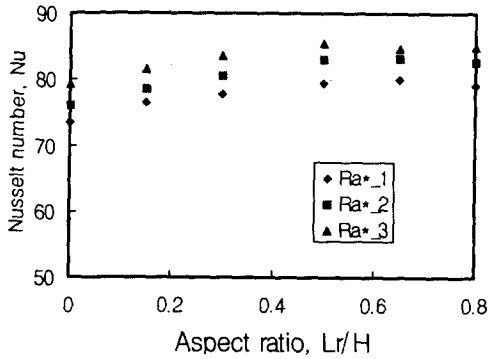


Fig. 7 Variation of Nu due to aspect ratio with different  $Ra^*$  for  $\phi=45^\circ$  and  $d^*=1.0$  ( $Ra^*_1=62 \times 10^8$ ,  $Ra^*_2=2.88 \times 10^8$ ,  $Ra^*_3=3.12 \times 10^8$ ).

화를 각각의 플럭스 Rayleigh 수에 대하여 나타낸 그림이다.

형상비  $Lr/H$ 가 0.0으로 단순 평행육면체형 밀폐공간으로만 구성된 경우보다 평행육면체형 상부에 직육면체형 밀폐공간을 조합하여  $A_r$ 을 증가시키수록 Nusselt 수가 크게 나타나고 있다. 특히 직육면체형 밀폐공간 길이가 방열부 높이의 1/2이 되는  $A_r=0.5$  부근에서 우수한 열전달 성능을 보였다. 이것은 단순 직육면체형과 평행육면체형을 조합한 복합 밀폐공간을 형성함으로써 2차 유동에 의한 에너지 손실을 최소화하고 주 대류열전달 형성을 촉진하여 집열부에서 방열부로의 열전달을 증가시켰기 때문이다.

4.5 자연대류 열전달 상관 관계식

열다이오드와 같은 밀폐공간의 자연대류에 대한 흐름 메커니즘 및 열전달 메커니즘은 매우 복잡하다. 따라서 밀폐공간에서의 자연대류에 대한 열전달 계수를 결정하는 문제는 수많은 연구과제로 되어 왔다. 이러한 문제에 대해서 방대한 양의 이론 및 실험적 연구가 진행되었는데도 불구하고 관계되는 실험변수들의 전영역을 포함할 수 있는 상관 관계식은 아직도 구하지 못하고 있다.

본 연구에서는 경사각을  $60^\circ$ 로 고정시키고 무차원 유동통로 깊이( $d^*$ ), 집·방열부 높이( $H$ ) 및 직육면체부 길이( $Lr$ )를 매개변수로 하여 열

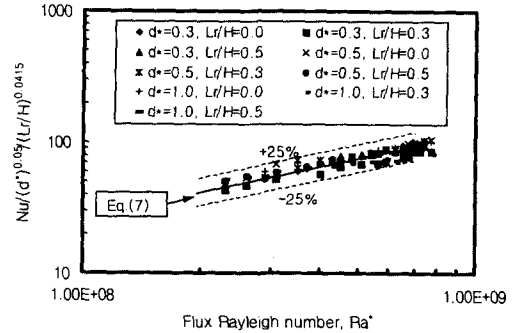


Fig. 8 Correlation of heat transfer results for  $\phi=60^\circ$ .

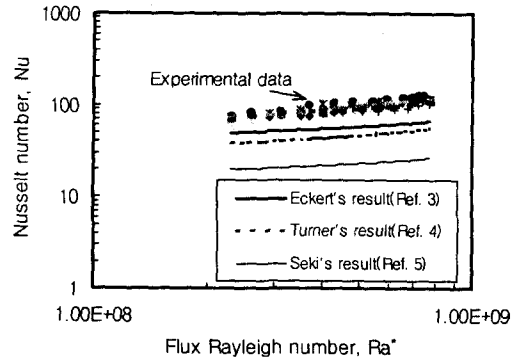


Fig. 9 Overall Nu variation as compared with other experimental results.

다이오드식 집열시스템의 자연대류 열전달 상관 관계식을 제시하였다.

자연대류 열전달 상관 관계식은 실험에 이용한 변수들 중 공급 열유속 및 작동유체 물성값에 영향을 받는 플럭스 Rayleigh 수, 열다이오드 내부 유동통로의 크기를 결정하는 무차원 유동통로 깊이( $d^*$ ) 그리고 열다이오드식 밀폐공간 직육면체부 길이 변화를 나타내는  $Lr/H$ 를 변수로 하여 최소자승법을 이용하여 구하였다.

Nu 수와 각종 인자들과의 상관성을 모두 포함한 실험 측정값들이 Fig. 8에 나타나 있다. 비교적 실험 측정값들이 고르게 분포한 것을 볼 수 있다.

Fig. 8에서 나타내고 있는 플럭스 Rayleigh 수와 각종 인자들을 포함한 Nusselt 수의 관계는 다음과 같은 일반적인 자연대류 열전달 상관식의

형태로 나타낼 수 있다.

$$Nu = a(Ra^*)^b (d^*)^m \left(\frac{Lr}{H}\right)^n \quad (6)$$

여기서 Nusselt 수와 플렉스 Rayleigh 수,  $d^*$ ,  $Lr/H$ 와의 기울기를 나타내는 상수  $b, m, n$ 은 Nusselt 수와 각각의 인자들과의 영향을 나타내는 값을 가지고 최소자승법을 이용하여 결정할 수 있다.

또한 각 조건들 사이에 존재하는 편차값을 평균하여 열다이오드의 자연대류 열전달 상관 관계식의 상수  $a$ 를 결정할 수 있다.

이와 같은 방법으로 결정된 열다이오드의 자연대류 열전달 상관 관계식은 다음과 같다.

$$Nu = 0.0037 (Ra^*)^{0.429} (d^*)^{0.05} \left(\frac{Lr}{H}\right)^{0.0415} \quad (7)$$

본 상관 관계식과 실험결과들과의 오차 범위는  $\pm 25\%$ 로서 비교적 안정된 범위에 속한다.

Fig. 9는 본 연구에서 실험한 단순 직육면체형과 평행육면체형을 조합한 열다이오드식 복합 밀폐공간 내의 자연대류 열전달 상관 관계식과 선행 연구자들 실험결과와 비교 고찰한 것이다.

본 연구에서 수행한 복합 밀폐공간 내의 자연대류 열전달 특성은 수직 가열부와 냉각부를 갖는 단순 직육면체형 밀폐공간 내의 자연대류 열전달 특성을 나타내는 Eckert et al.<sup>(3)</sup>의 연구결과와 집중된 냉각부를 갖는 Turner et al.<sup>(4)</sup>의 연구결과 및 평행육면체형 밀폐공간을 가지고 실험한 Seki et al.<sup>(5)</sup>의 연구결과보다 정량적으로 다소 높은 Nusselt 수를 나타내고 있다. 이것은 실험조건이 선행 연구자들의 연구결과를 토대로 밀폐공간 내의 열전달을 촉진시킬 수 있도록 단순 직육면체형과 평행육면체형을 조합한 복합 밀폐공간을 형성하였기 때문이다.

## 5. 결 론

열다이오드식 복합 밀폐공간의 저온 방열부에 수냉각 장치를 설치하고 실험한 열전달 특성에 관한 결론은 다음과 같다.

(1) 모든 경사각에 대하여 플렉스 Rayleigh 수

가 증가할수록 Nusselt 수가 완만하게 증가하였고, 경사각 영향에 대한 Nusselt 수의 변화는 각 실험 인자들의 누승 함수 형태를 취하고 있으며 경사각이 증가할수록 완만한 기울기를 가지고 Nusselt 수가 증가하였다.

(2) 경사각이  $60^\circ$ 로 커지게 되면 내부유동통로 깊이 변화에 따른 열전달 성능 변화가 뚜렷하다. 특히 무차원 유동통로깊이가 0.5~0.7로 내부유동통로의 폭이 어느 정도 클 때 Nusselt 수가 높게 나타났다.

(3) 직육면체부 길이가 방열부 높이의 1/2이 되는  $Lr/H=0.5$  부근에서 우세한 열전달 성능을 보였다.

(4) 열다이오드식 복합 밀폐공간의 자연대류에 의한 열전달률은 다른 선행 연구자들에 의하여 수행된 단순 밀폐공간의 열전달률보다 10~47% 정도 크다.

## 참고문헌

- Garg, H. P., Mullic, S. C. and Bharagava, A. K., 1985, Solar thermal energy storage, Reidel Publishing Company, pp. 82-128.
- Kakac, S., Paykoc, E. and Yener, Y., 1989, Energy storage system, Kluwer Academy Publishers, pp. 129-161.
- Eckert, E. G. and Calson, W. O., 1961, Natural convection in a layer enclosed between two vertical plates with different temperatures, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 2, No. 2, pp. 106-120.
- Turner, B. L. and Flack, R. D., 1980, The experimental measurement of natural convective heat transfer in rectangular enclosures with concentrated energy sources, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 102, No. 2, pp. 236-241.
- Seki, N., Fukusako, S. and Yamaguchi, A., 1983, An experimental study of free convective heat transfer in a parallelogrammic enclosure, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 105, No. 3, pp. 433-439.
- Chen, K., 1985, The optimum configuration of natural convection loops, Solar Energy,

- Vol. 34, No. 4, 5, pp. 407-416.
7. Chen, K., 1988, Design of a plane-type bidirectional thermal diode, J. of Solar Energy Engineering, Vol. 110, No. 3, pp. 299-305.
  8. Chun, W. G., Chen, K., Lee, T. K. and Kim, H. T., 1994, An experimental study on the performance of a loop thermal diode, Solar Energy, Vol. 14, No. 3, pp. 55-60.