

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol.17. No.3. 1997

## 에너지 절약을 위한 벽체형 열다이오드 개발에 관한 기초

박이동\*, 장영근\*\*, 최성식\*\*\*

- \* 성균관대학교 기계공학과
- \*\* 성균관대학교 기계공학과 대학원
- \*\*\* 용인공업전문대학

## A Fundamental Study on Development of a Wall Structure type Thermal Diode for Energy Saving

E. T. Pak\*, Y. G. Chang\*\*, S. S. Chea\*\*\*

- \* *Sung Kyun Kwan University*
- \*\* *Graduate school, Sung Kyun Kwan University*
- \*\*\* *Yong-In Technical College*

### 요 약

공기는 열전도 계수가 낮으므로 밀폐공간 내에서 적당한 형태를 형성하여 자연대류 열전달을 촉진 시키다면 태양열 집열기로서 건물 난방에 이용할 수 있고, 또 자연대류가 일어나지 않도록 유동을 억제 시킨다면 매우 훌륭한 단열재로 사용할 수 있다

따라서, 본 연구에서는 건물벽 구조에 따라 내·외벽 사이에 단순 사각 밀폐공간을 형성하여 외벽의 가열부와 내벽의 방열부의 위치를 변화시켜 가며 수치해석을 수행하여 최대 난방 및 단열효과를 얻을 수 있는 새로운 대체 건물벽 개발에 관한 기초 설계 자료를 제시하고자 한다.

연구 결과 부력에 의한 driving force를 얻기 위해서는 방열부가 가열부보다 항상 위쪽에 위치하고 크기는 전체 높이의 1/2 이하일 때 열전달이 촉진됨을 알았다.

## Abstract

In order to development of a new wall structure type thermal diode for energy saving, the numerical studies have been performed for natural convection across an rectangular enclosure with the various lengths of the heat source and sink plate.

The governing equations for the two-dimensional, laminar, natural convection process in an enclosure are discretized by the control volume approach which insures the conservative characteristics to be satisfied in the calculation domain, and solved by a elliptic SIMPLE algorithm. The momentum and energy equations are coupled through the buoyancy term.

## Nomenclature

$C_p$	specific of heat at constant pressure
$H$	height of the composed-enclosure
$k$	conductivity of the fluid
$L_c$	length of the heat sink plate of enclosure
$L_h$	length of the heat source plate of enclosure
$q''$	heat flux supplied to the heat source
$T_c$	heat sink temperature
$T_{ref}$	reference temperature of the fluid
$W$	width of the paralleogrammic portion of enclosure
$\beta$	coefficient of volumetric expansion
$\mu$	absolute viscosity of the fluid
$\rho$	density of the fluid
$\rho_{ref}$	reference density of the fluid

## 1. 서론

공기는 열전도 계수가 낮으므로 밀폐공간 내에서 적당한 형태를 형성하여 자연대류 열전달을 촉진 시키다면 태양열 집열기로서 건물 난방에 이용할 수 있고, 또 자연대류가 일어나지 않도록 유동을 억제 시킨다면 매우 훌륭한 단열재

로 사용할 수 있다.

이와 같은 공기를 이용한 단순 사각 밀폐공간에서의 자연대류 열전달에 관한 실험 및 수치해석적 연구는 많이 있다.<sup>(1,2,3,4)</sup> 그 중에서도 1976년 Chu와 Churchill<sup>(5)</sup>은 집중된 고온부를 갖는 경우 고온부의 위치변화에 따른 열전달을 해석하였고 1980년 Turner와 Flack<sup>(6)</sup>은 이와는 반대로 한쪽의 모든 수직벽은 고온으로 일정하게 유지되고 반대벽은 집중된 냉각부를 가지고 있을 때 자연대류 열전달에 대하여 실험적으로 연구하였다. 연구 결과 집중 냉각부의 길이가 길수록, 집중 냉각부의 위치가 고온 수직벽 높이의 1/2~2/3에 위치 할 때 자연대류 열전달이 잘 이루어짐을 밝혔다.

건물벽은 내벽과 외벽 사이의 폭(W)이 좁고 높이(H)가 크다. 즉, H/W가 큰구조를 가지고 있다. 현재까지는 건물벽이 단열효과를 얻기 위하여 고체 단열재를 이용하고 있다. 그러나 내벽과 외벽 사이의 공간을 고체 단열재로 채우지 않고 공기가 가득찬 밀폐공간으로 만들면 공기를 작동매체로 하여 자연대류 열전달에 의한 겨울철 주간에는 외부고온을 실내로 전달시켜 난방에 이용하고 야간에는 열전도 계수가 낮은 공기를 효과적으로 이용하여 실내에서 실외로 빠져나가는 열을 차단할 수 있다. 이러한 것이 기존의 건물벽을 대체할 수 있는 에너지 절약형

건물벽이 될 수 있으며 최근에 열다이오드라는 개념으로 활발히 연구중에 있다.<sup>(7,8)</sup>

따라서, 본연구에서는 건물벽 구조에 따라 폭을 400mm로 고정시키고 높이를 400, 800, 1200, 1600mm로 변화시켜 H/W가 1, 2, 3, 4 일때에 대하여 고온벽과 저온벽의 위치를 변화시켜 가며 수치해석을 수행하여 최대 난방 및 단열효과를 얻을 수 있는 새로운 대체 건물벽 개발에 관한 기초 설계 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 이론해석

### 2.1 지배방정식 및 경계조건

수직 가열벽과 등은 수직 냉각벽을 갖는 사각 밀폐공간의 도식적 형상과 좌표계는 Fig. 1과 같다. 열다이오드의 기초 연구로서 건물벽과 유사하게 하기 위하여 외벽과 내벽 사이의 거리를 400mm로 고정시키고, 외벽에 태양열 일사량에 해당하는 일정열속을 공급하는 Heat source부의 크기를 변화시키고, 내벽의 방열부는 일정온도 조건으로 하여 크기를 변화시켰다. 외벽의 가열벽과 내벽의 냉각벽 사이의 열전달 해석을 위하여 다음과 같은 가정 조건을 취하였다.

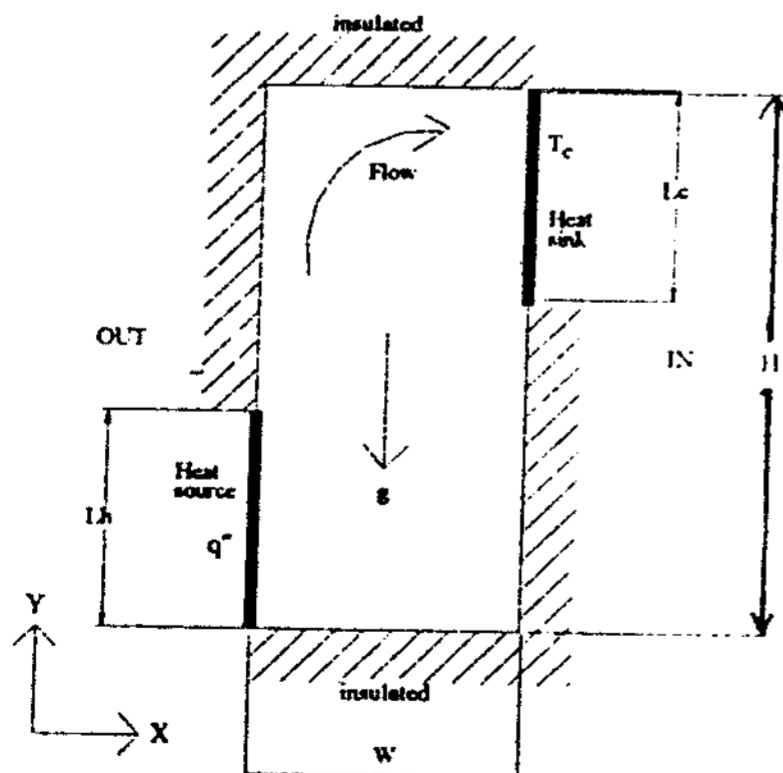


Fig. 1 Schematic diagram of the rectangular enclosure

유동은 정상상태이고, 유체는 Boussinesq Approximation을 따르며, 에너지 방정식에서 점

성 소산항은 무시하였다.

이상의 가정을 도입하여 2차원 비압축성, 층류 자연대류에 대하여 지배방정식을 세우면 다음과 같다

연속방정식:

$$\nabla \cdot \rho V = 0 \quad (1)$$

운동량방정식:

$$V(\nabla \cdot \rho V) = -\nabla p + \mu \nabla^2 V - g \cdot \beta \cdot \rho_{ref}(T - T_{ref}) \quad (2)$$

에너지방정식:

$$\rho C_p (V \cdot \nabla T) = k \nabla^2 T \quad (3)$$

공기가 채워진 사각 밀폐공간에서의 열전달 해석을 위한 지배 방정식 (1), (2), (3)에 대한 해를 구하기 위한 경계 조건은 다음과 같다.

· 방열부인 heat sink면

$$u = v = 0, \quad (\text{non-slip condition}) \\ T = T_c = 15^\circ\text{C}, \quad (4)$$

· 가열부인 heat source면

$$u = v = 0, \quad (\text{non-slip condition}) \\ q'' = 150 \text{ W/m}^2 \quad (5)$$

· 단열평판표면

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

### 2.2 수치해석 방법

밀폐공간안의 공기에 대한 물성치는 상온에서의 값을 사용하였다. 기본 방정식은 검사체적 공식 방법으로 차분화 하였는데 이 방법은 하나의 작은 검사체적에 관하여 기본 방정식<sup>(1)</sup>에서<sup>(3)</sup>까지를 차분화시키는 방법이다.<sup>(9)</sup> 최종 차분화된 방정식은 검사체적안의 격자점 P에서 다음과 같이 일반화 될 수 있다.

$$A_P \phi_P = \sum A_{nb} \phi_{nb} + B$$

여기서  $\phi$  는 속도 혹은 온도를 표시하고 하첨자  $nb$  는 격자점  $P$  에 이웃하는 격자점을 표시한다.

이 연구에서는 유동을 2차원으로 가정하였기 때문에 4개의 이웃하는 격자점이 존재한다. 이와 같이 차별화된 방정식은 Elliptic SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 유한 차분법에 의하여 해가 구하여지고 하나의 시간 구간마다 Under-Relaxation 반복법에 의하여 수렴된다. Under-relaxation factor는 0.5부터 시작하여 수렴정도에 따라 factor를 줄여서 factor가 0.1근처에서 수렴값을 얻었고 반복횟수가 2000회 정도에서 수렴되었다.

수치 계산 과정에서 1회 반복계산마다 해의 수렴성을 알아보기 위하여 가열벽과 냉각벽 사이에서 평균 Nusselt 수를 구하여 열평형성을 조사하였는데 열평형 오차가 0.01% 이내가 되면 충분히 수렴되었다고 간주하였다

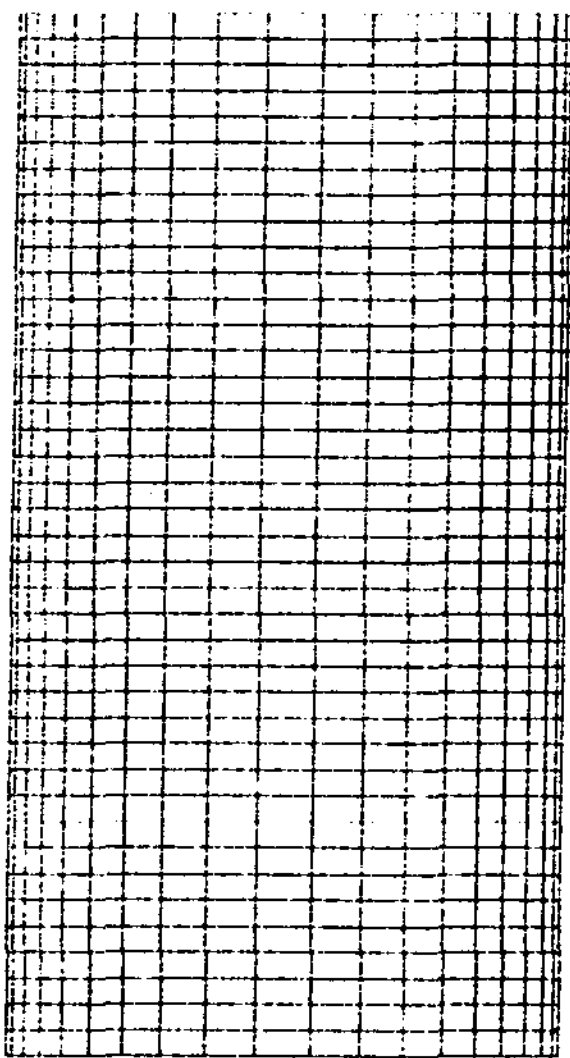


Fig. 2 Grid system of the rectangular enclosure

격자점의 배열에 따라 한 개의 해를 구하는데 32bit PC를 사용하여 보통 0.5~1시간 정도

소요되었다. 격자점의 배열은 사각 밀폐공간의 크기에 따라 21×21에서 21×61까지 설정하였고 정확한 해를 구하기 위하여 가열벽과 냉각벽에서 조밀격자를 취하였다. 이와 같은 격자점 배열이 Fig. 2에 도식화 되어 있다

평균 Nusselt 수는 다음 식에 의하여 계산하였다.

평균 Nusselt 수:

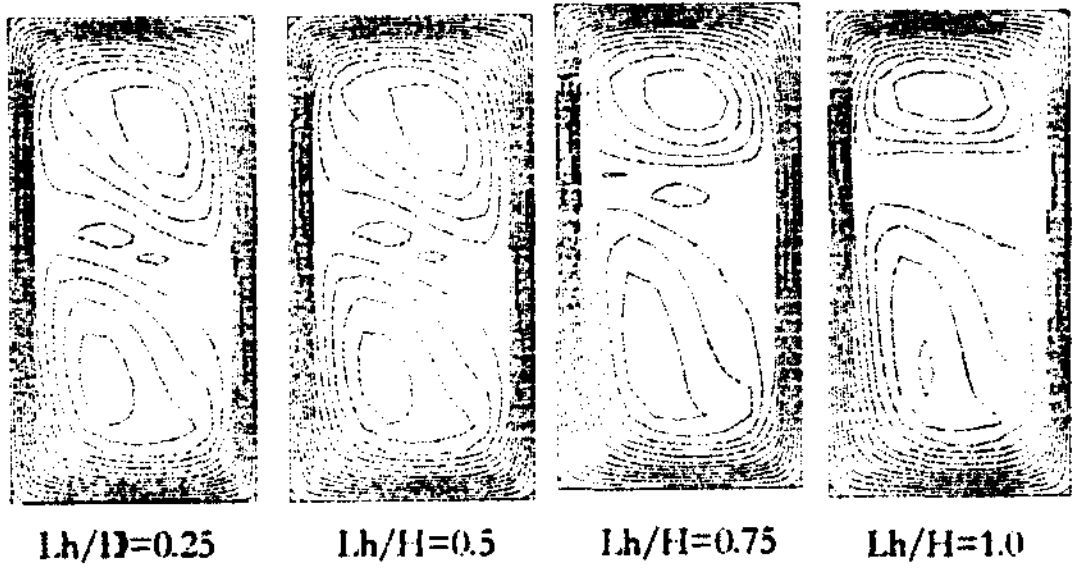
$$Nu = \frac{q' W}{k \Delta T}$$

### 3. 결과 및 고찰

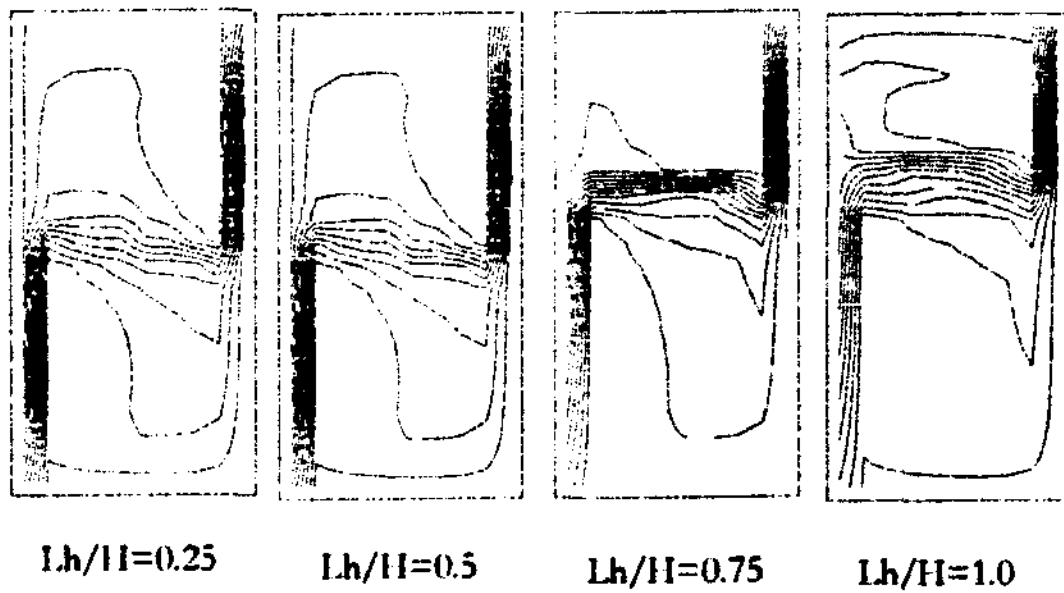
Fig. 3은 H/W가 2일때 냉각벽의 높이인,  $L_c$ 를 20cm로 고정시키고 가열벽의 높이인,  $L_h$ 를 20, 40, 60, 80cm로 변화 시켜서  $L_h/H$ 가 0.25, 0.5, 0.75, 1.0인 경우에 대하여 사각 밀폐공간 내에서의 유선 및 등온선 분포를 나타낸 것이다.

그림 (a)에서 볼 수 있듯이 가열벽의 높이가 증가할수록 상부로 유선이 조밀하게 분포한다. 이것은 가열벽의 높이가 증가할수록 더 큰 부력의 영향을 받아 사각 밀폐공간 안의 온기가 냉각벽으로 방열 되지 못하고 상부로 이동하여 정체되기 때문이다. 그림 (b)의 등온선 분포에서도  $L_h/H$ 가 증가할수록 온도 분포가 상부로 이동하는 것을 볼 수 있다. 또한 가열벽의 높이 변화를 나타내는  $L_h/H$ 가 0.5를 기준으로 유동분포 및 등온선 분포가 상이한 것을 볼 수 있다.

따라서 겨울철 주간에 실내에 위치한 냉각벽인 heat sink부의 높이를 고정시키고, 실외에 위치한 태양열 집열기인 heat source부의 높이를 변화시킬 때에는 전체 높이의 1/2이하로 제작하는 것이 heat source부에서 heat sink부로의 열전달 촉진에 효과적임을 알 수 있다.

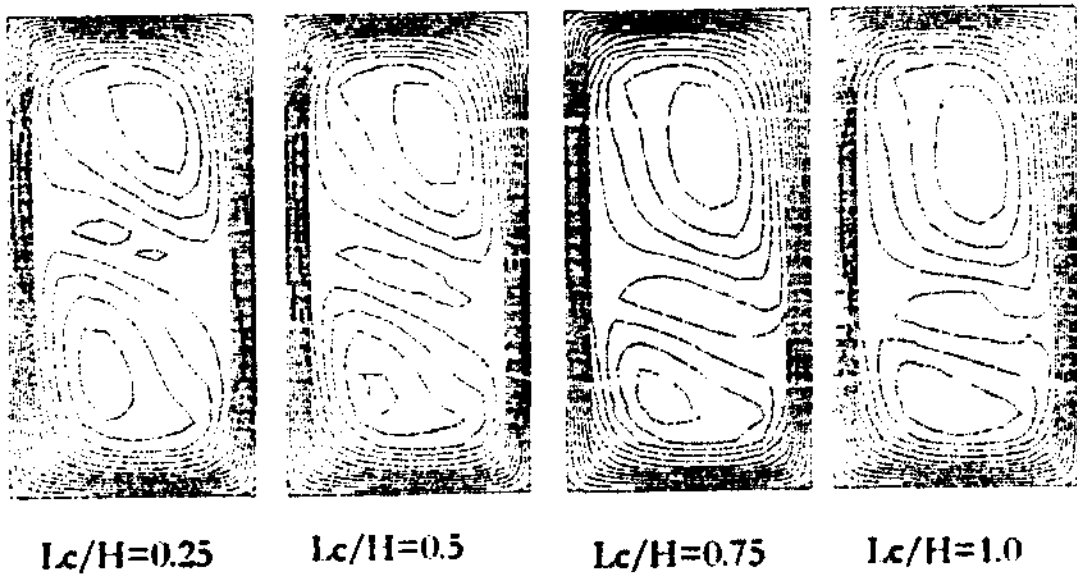


(a) Streamlines

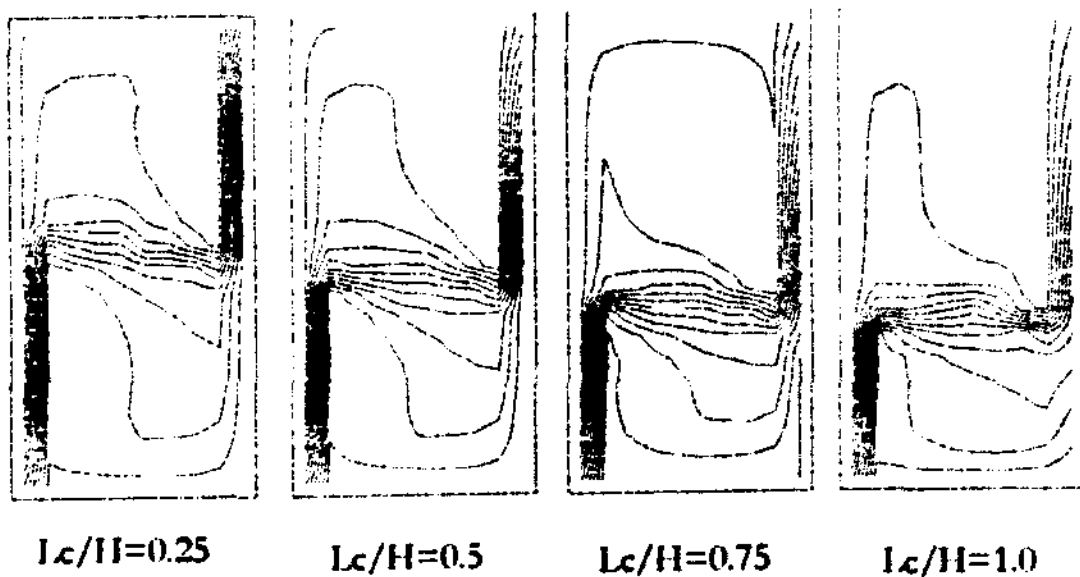


(b) Isotherms

Fig. 3 Isotherms and streamlines of various Lh/H



(a) Streamlines



(b) Isotherms

Fig. 4 Isotherms and streamlines of various Lc/H

Fig. 4는 Fig. 3에서 해석한 것과는 반대로 가

열벽의 높이를 20cm로 고정시키고 냉각벽의 높이가 변화할 때의 유선 및 등온선 분포를 나타낸 것이다. 앞서서와는 반대로 냉각벽의 높이가 증가할수록 가열된 사각 밀폐공간 안의 온기가 냉각벽으로 쉽게 방열되어 유선 및 등온선 분포가 완만한 것을 볼 수 있다. heat sink부의 높이가 작은,  $L_c/H$ 가 0.5이하에서는 유선 분포 및 등온선 분포가 냉각벽 근처에서 조밀하게 밀집되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 가열된 온기가 쉽게 방열되지 못하고 사각 밀폐공간 안에 정체되기 때문이다.

따라서 실내의 방열부 크기는 되도록 크게 해야한다. 그러나 겨울철 야간의 경우에는 실내의 온기가 실외로 공기를 통한 순수 열전도에 의하여 방출되기 때문에 열전달 면적이 너무 크게 되면 외부로의 열손실이 많이 발생한다. 그러므로 방열부의 크기는 주·야간의 열전달 경우를 모두 고려하여 적절하게 설계해야만 한다.

Fig. 5는 벽체형 열다이오드의 적절한 높이를 결정하기 위하여  $L_h/H$ 와  $L_c/H$ 를 0.5로 고정시키고  $H/W$ 를 1, 2, 3, 4로 변화시켜 가며 수치 해석을 수행한 결과이다.  $H/W$ 가 증가할수록 즉, 높이가 증가할수록 열전달율을 나타내는 평균  $Nu$ 수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 벽체형 열다이오드 하나의 크기는 높이가 내·외벽의 폭과 같게 제작하는 것이 최대의 열전달 효과를 얻을 수 있다.

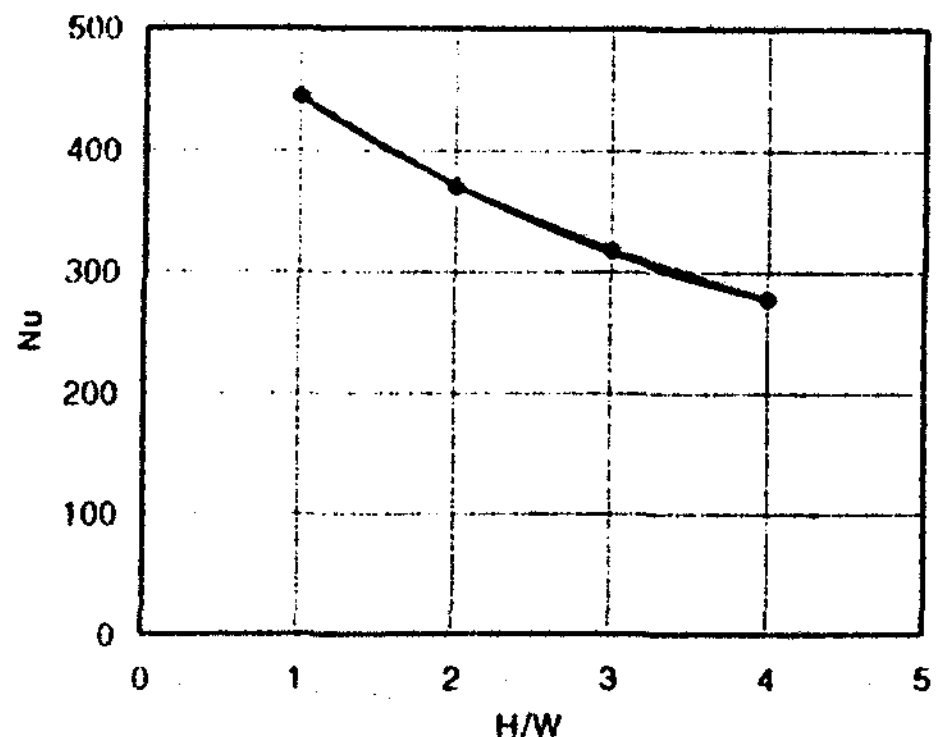


Fig.5 Nusselt number variation with different H/W

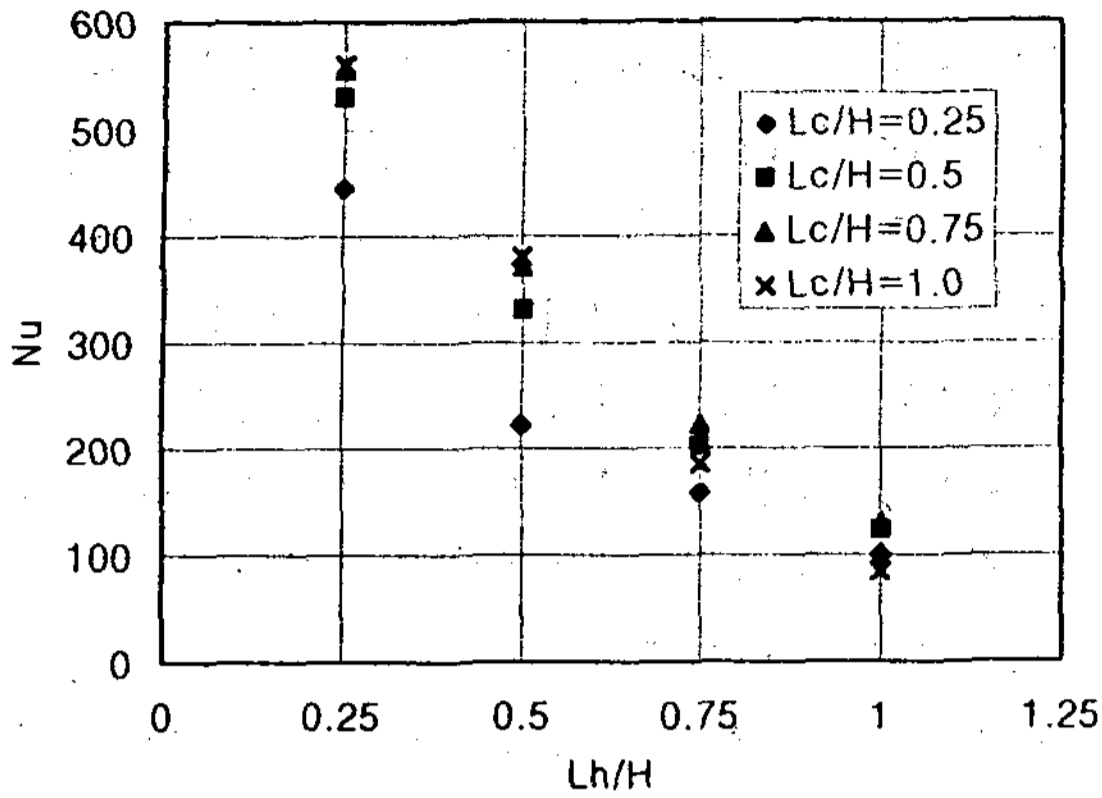


Fig. 6 Nusselt number variation with different Lh/W

Fig. 6은 H/W가 2일때 heat source부의 높이에 대한 평균 Nu수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3의 유선 및 등온선 분포에서 보았듯이 Lh/H가 증가할수록 열전달율이 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 Lh/H가 1일때 Lc/H를 변화시켜가며 사각 밀폐공간에서의 열전달 효과를 해석한 Turner와 Flack의 결과와 본 연구에서 수행한 수치해석 결과를 비교한 그래프이다. 냉각벽의 높이가 증가할수록 정량적인 Nu값은 다르지만 정성적인 경향은 서로 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 수행한 수치해석 결과들이 잘 수렴되었음을 알 수 있다.

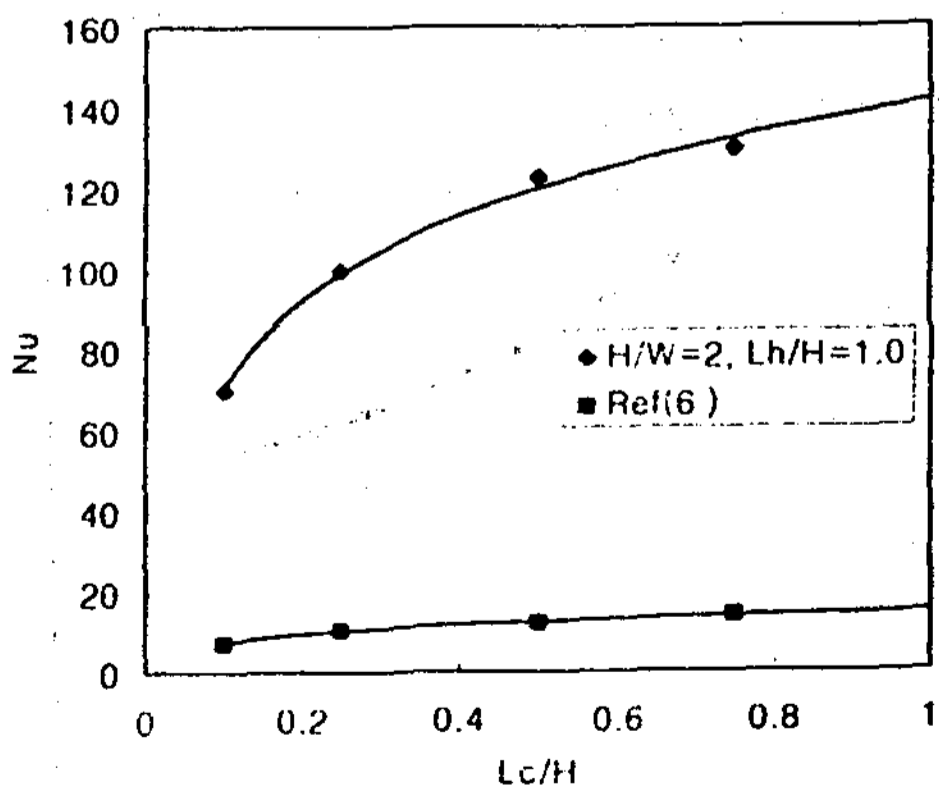


Fig. 7 Overall Nusselt variation as compared to other experimental data

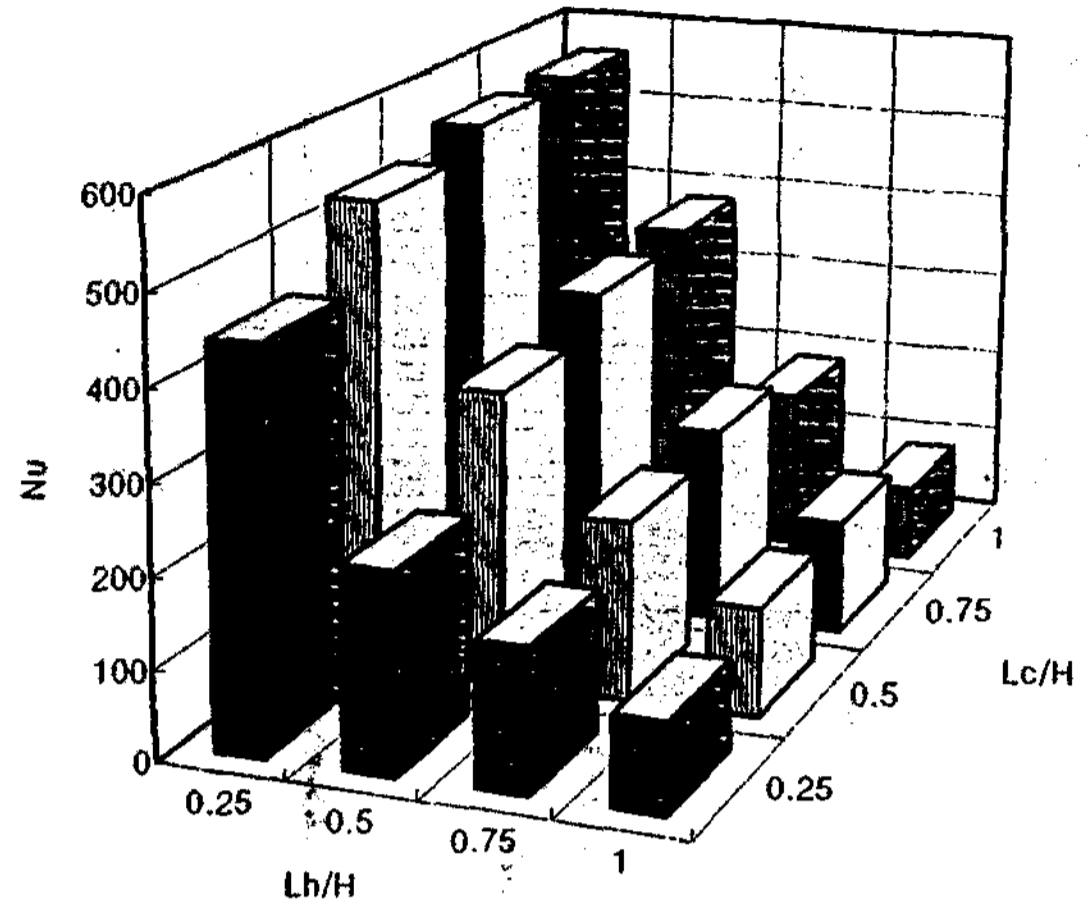


Fig. 8 Nusselt number variation with different Lh/H Lc/H

Fig. 8은 heat source부의 높기와 heat sink부의 높이 변화에 대한 평균 Nu수의 변화를 동시에 나타낸 3차원 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 가열부의 높기가 작고 냉각부의 높기가 큰 경우에 보다 높은 Nu값을 나타내고 있다. 그러나 야간의 열전도에 의한 에너지 손실을 최소화 하기 위해서는 Lh/H와 Lc/H 모두를 0.25로 제작 하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다. 또한 Lh/H와 Lc/H가 모두 1인 즉, 단순 사각 밀폐공간에서 가열벽과 냉각벽의 높기가 같은 경우에 가장 낮은 Nu값을 나타내고 있다. 따라서 heat source부에서 heat sink부로의 열전달을 촉진하기 위해서는 heat sink부가 heat source부 보다 상부에 위치하여 가열벽에서 가열된 온기의 부력에 의한 driving force를 극대화 할 수 있어야만 한다.

#### 4. 결론

열전도 계수가 낮은 공기를 이용하여 기존의 건물벽을 대체할 수 있는 새로운 에너지 절약을

위한 벽체형 열다이오드 개발에 관한 이상의 수치해석 결과들을 종합하면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

벽체형 열다이오드의 높이는 폭과 같은 크기로 설계하고, 주·야간의 열전달 방향성을 고려하여 가열부인 heat source부와 방열부인 heat sink부의 높이는 열다이오드 전체 높이의 0.25로 제작하며 가열부의 부력에 의한 driving force를 얻기 위해서는 방열부가 가열부보다 항상 위쪽에 위치해야만 한다.

향후, heat source부에서 heat sink부로의 열전달을 촉진시키기 위해서는 사각 밀폐공간 내의 형상에 관한 연구도 필요하다.

#### \* 참고문헌

1. 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
2. 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
3. E. G. Eckert and W. O. Calson, 1961, "Natural convection in a layer enclosed between two vertical plates with different temperatures", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 2, p.p. 106~120
4. G. C. Vliet, 1969, "Natural convection local heat transfer on constant heat flux inclined surfaces", J. of Heat Transfer, Vol. 91, p.p. 511~516
5. S. W. Churchill, H. H. S. Chu, 1975, "Correlating equation for laminar and turbulent free convection from a vertical plate", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp. 1323~1332
6. B. L. Turner, R. D. Flack, 1980, "The experimental measurement of natural convective heat transfer in rectangular enclosures with concentrated energy sources", J. of Heat Transfer, Vol. 102, pp. 236~241
7. K. Chen, 1988, "Design of a plane-type bidirectional thermal diode", J. of Solar Energy Engineering, Vol. 110, p.p. 299~305
8. 천원기, K. Chen, 이태규, 김형택, 1994, "Loop 형 Thermal Diode의 열성능에 관한 기초 연구", 태양 에너지, Vol. 14, No. 3, p.p. 55~60
9. Karki, K. C. and Patankar, S. V., 1988, "Calculation procedure for viscous incompressible flows in complex geometries", Numerical Heat Transfer, Vol. 14, pp. 295-308.

# A Fundamental Study on Development of a Wall Structure type Thermal Diode for Energy Saving

**E. T. Pak<sup>\*</sup>, Y. G. Chang<sup>\*\*</sup>, S. S. Chea<sup>\*\*\*</sup>**

\* *Sung Kyun Kwan University*

\*\* *Graduate school, Sung Kyun Kwan University*

\*\*\* *Yong-In Technical College*

## Abstract

In order to development of a new wall structure type thermal diode for energy saving, the numerical studies have been performed for natural convection across an rectangular enclosure with the various lengthes of the heat source and sink plate.

The governing equations for the two-dimensional, laminar, natural convection process in an enclosure are discretized by the control volume approach which insures the conservative characteristics to be satisfied in the calculation domain, and solved by a elliptic SIMPLE algorithm. The momentum and energy equations are coupled through the buoyancy