

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 15, No. 3, 1995

## 단열벽체두께가 변화되는 밀폐공간에서 복사-자연대류열전달특성에 관한 연구

권용일\* · 유지오\* · 권순석\*\*

\* 신홍전문대학 건축설비과 전임강사

\*\* 동아대학교 기계공학과 교수

### **A Study on the Heat Transfer Characteristics of Surface Radiation-Natural Convection Interactions in an Enclosure for Various Adiabatic Wall Thicknesses**

**Y.I. Kwon\* · J.O. Yoo\* · S.S. Kwon\*\***

#### 요 약

본 연구는 온돌공간으로 가정한 2차원 밀폐공간에서 단열벽체두께를 변화시켜 표면복사-자연대류 열전달특성에 대해 수치해석방법을 이용하여 고찰하였다.

복사열전달이 동반된 자연대류인 경우, 밀면의 평균Nusselt수는 벽면방사율이 증가함에 따라 증가하고 벽체의 무차원두께가 감소함에 따라 증가되며 순수자연대류인 경우보다 큰 값을 나타낸다.

밀면의 평균Nusselt수는 단열벽체의 두께를 감소시킴에 따라 복사열 전달을 동반하는 자연대류의 대류열전달량이 자연대류의 열전달량보다 다소 작은 값을 나타냈다.

## Abstract

This study is investigated numerically on the heat transfer characteristics of surface radiation-natural convection interactions in a two dimensional enclosure assumed Ondol cavity.

Mean Nusselt number of the bottom surface with surface radiation is increased by increasing wall emissivity and by decreasing dimensionless thickness of adiabatic wall, and is greater than that without radiation.

Mean Nusselt number of the bottom surface for convection only with surface radiation is slightly smaller than that without surface radiation with decrease dimensionless thickness of adiabatic wall.

### 기호설명

F	: 형상계수	y	: 수직방향 좌표
g	: 중력	Y	: 무차원 수직방향 좌표(y/L)
H	: 밀폐공간의 수직방향길이	$\alpha$	: 열확산계수
R	: 무차원 출사( $R/\sigma t_m^3 \Delta T$ )	$\beta$	: 열팽창계수
k	: 열전도율	$\epsilon$	: 방사율
L	: 밀폐공간의 수평방향길이	$\nu$	: 동점성계수
N	: 수정된 Stark수	$\sigma$	: Stefan - Boltzmann상수
n	: 미소 벽면갯수	$\phi$	: 무차원 온도( $t/(t_h - t_c)$ )
Nu	: Nusselt수( $hL/K_f$ )		
Pr	: Prandtl수( $\nu/\alpha$ )	하첨자	
p	: 압력	B	: 밑면
P	: 무차원 압력( $p/\rho(\nu/L)^2$ )	C	: 저온부 또는 대류
q	: 복사열유속	f	: 유체
Q	: 무차원 복사열유속( $q/\sigma t_m^3 \Delta T$ )	h	: 고온부
Ra	: Rayleigh수( $g\beta L^3(t_h - t_c)/\nu\alpha$ )	i	: 복사의 미소영역 기준면
t	: 온도 또는 벽체두께	j	: 복사의 미소영역 목표면
u	: 수평방향 속도	m	: 평균
U	: 무차원 수평방향 속도( $uL/\nu$ )	mrt	: 평균복사온도
x	: 수평방향 좌표	OT	: 작용온도
X	: 무차원 수평방향 좌표(x/L)	R	: 창문 또는 우측벽체
v	: 수직방향 속도	w	: 벽체
V	: 무차원 수직방향 속도( $vL/\nu$ )	l	: 창문의 길이

## I. 서 론

온돌난방은 주택에 거주하는 인간의 쾌적한 생활을 위해 수행하는 난방방식이다. 온돌공간에서 실내의 전열특성에 영향을 미치는 주요 인자는 일사량 및 벽체의 단열성이다. 실내공간에서 자연대류열전달 현상을 발생시키는 온돌난방은 복사열전달이 동반되므로 pannel난방방식에 의한 복사난방과 같이 대류열전달량이 감소되는 효과가 있다고 알려져 있다.<sup>1)</sup>

최근 온돌난방에 관한 연구가 활발히 수행되어져 왔지만 연속가변적인 일사량과 외기조건, 바닥과 벽체의 비정상상태의 열적특성과 외벽의 구성형태, 환기열손실과 창문을 통한 열손실 및 3차원공간내의 난류유동에 의해 열적특성을 정량적으로 해석하기는 상당한 어려움이 있다.

Fusegi와 Farouk<sup>2)</sup>는 정사각형 밀폐공간내에 비회색 기체로 채워진 경우에 대해 표면복사와 기체복사열전달이 고려된 층류와 난류자연대류 현상을 해석하였으며 기체복사에 대한 해석은 P-1 방법을 선택하였다.

Larson과 Viskanta<sup>3)</sup>는 해석영역의 형상이 정사각형일 때 형상함수를 Kernelk방법을 이용하여 복사열유속방정식을 해석하였으며 밀면은 고온부이고 좌, 우 및 윗면이 저온부인 경우 기체매질이 존재하는 경우, 해석영역에서 복사열전달이 유동과 열전달에 크게 영향을 미치는 것을 고찰하였다.

Huang과 Lin<sup>4)</sup>은 작동유체가 흡수, 방사를 하는 회체이고 3차원 층류유동이 발생하는 channel의 벽면은 냉각이 되는 저온부이며 복사에 대해 흑체로 가정하였다. 냉각벽면에 의해 좌, 우 벽면부근에서 하향유동이 발생되고 중앙부근에서 상향유동하는 부력효과를 나타

내고 있으며 고온의 유체와 냉각벽체의 온도 차이가 커지면 2차유동이 발생됨을 고찰하였다.

Meyer등<sup>5)</sup>은 정사각형 공간이 수평으로 무한히 배열된 경우 상면과 하면이 고온부와 저온부로서 열전달이 일어나고 좌, 우면이 전도에 의해 열손실이 발생된다고 가정하여 전도벽면의 두께 따른 열손실의 영향을 고찰하였다. 좌, 우 벽면을 Dirichlet경계조건을 적용시켜 정사각형공간이 회전될 때 열전달특성에 대해서 연구하였다.

Lage와 Lim<sup>6)</sup>은 발전소의 통로공간을 상부가 열려있는 직사각형공간으로 2차원화하여 좌측면의 가열온도, 벽면방사율을 변수로하여 복사 및 자연대류열전달에 대해 연구하였다.

본 연구는 일사량이 없는 밤으로 가정된 온돌공간을 2차원화 한 정사각형 밀폐공간에서 공간을 구성하는 벽체의 두께와 벽면방사율 그리고 외기온도(Rayleigh수)를 변수로 하여 표면복사-자연대류 열전달특성을 고찰한 것이다.

실제, 건축물의 설계를 실시할 때, 에너지 절약 측면에서 벽체의 열관류율을  $0.5\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 로 규제하고 있다. 이 경우는 벽체가 복합재질인 경우이지만 본 연구에서는 하나의 단열재질을 이용하여 법규에 적용하는 열관류율에 부합되게 적용하여 온돌공간 내에서 전열특성을 복합재질을 가진 벽체구성과 동일하게 모사 할 수 있으므로 단열벽체의 재질을 polystyrene로 선정하고 열전도율이  $0.023\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 일때 벽체두께를  $0.037\text{m}$ 를 선정하면 법규와 동일한 열관류율을 얻으므로 온돌공간의 수평거리가  $3.7\text{m}$ 인 정사각형공간으로 가정하여 벽체의 두께가 자연대류 및 복사열전달에 미치는 영향을 외기온도와 벽면방사율을 변화시켜 고찰하였다.

표면복사열전달을 해석하기 위해 사용한 복사전달방식은 확산반사가 존재하는 밀폐공간의 해석에 적합한 simplified zone analysis method<sup>7)</sup>를 사용하였고 이 방정식을 각 표면의 복사물성치가 파장에 영향을 받지 않는다고 가정하여 복사열유속방정식을 단순화 하였다. 형상계수(shape factor)<sup>7)</sup>는 direct integral method를 사용하여 구하였다.

## 2. 이론해석

### 2.1 지배방정식 및 경계조건

연구대상으로 취한 정사각형 밀폐공간의 기하학적 형상과 격자계는 Fig.1과 같다. 온돌면으로 가정된 밑면은 고온부  $T_h$ , 창으로 가정된 우측면의 중앙부분은  $t$ 이며 온돌면과 창문을 제외한 모든 벽체재질이 polystyrene ( $k_w/K_r=1.03$ )인 경우 두가지 경우로 가정하였다. 창문의 높이( $H_c$ )은  $H/3$ 으로 가정하였다. 밀폐공간의 내부유체는 복사에 대해서 투명공

기이고 유체의 모든 물성치는 고온부인 온돌면과 저온부인 우측면저온부(창문)의 평균온도를 기준으로 하였다. 전도가 발생하는 벽체의 무차원두께( $t/L$ )는 0.01~2.0으로 변화시켰다. 온돌공간내의 모든 벽면은 복사에 대해서 회체로 가정하며 벽면방사율( $\epsilon$ )은 0.1~0.9로 변화시켰다. 외기 온도조건은 0℃, -5℃, -11℃로 가정하여 Rayleigh수는 각각  $8.21 \times 10^4$ ,  $1.25 \times 10^5$  및  $1.79 \times 10^5$ 이며 Prandtl수는 0.71이다.

본 연구에서 수치해석을 위해 가정한 유동은 2차원 정상층류유동이고 유체는 비압축성 뉴턴유체이다. 모든 물성치는 부력항에서 나타나는 밀도변화외에는 일정하며 에너지방정식에서의 열소산항은 무시한다. 이와 같은 조건에서 무차원변수를 이용하여 지배방정식을 다음과 같이 무차원화하였다.

연속방정식

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

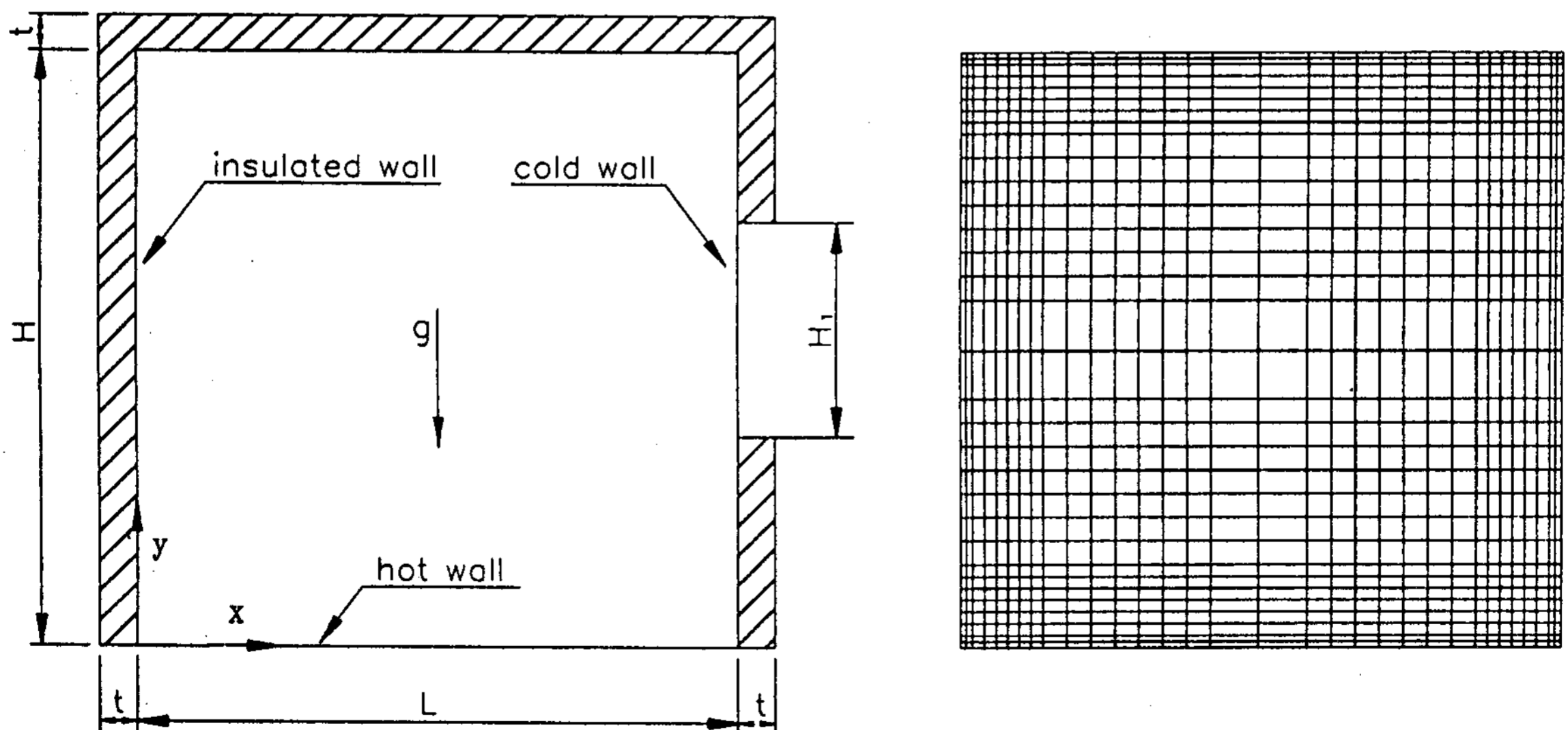


Fig. 1 schematic diagram and grid system of geometry investigated

운동량방정식

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{Ra}{Pr} (\phi - \phi_m) \quad (3)$$

에너지방정식

$$U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y} = \frac{1}{Pr} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

식(3)에서  $\phi_m$ 은 밀폐공간내부의 산술평균 온도를 나타낸다.

2.2 복사열유속방정식

복사열유속방정식이 만족하기 위해서 다음과 같은 가정이 필요하다.

- (1) 벽면은 불투명한 회체이며 확산방사 및 반사를 하며 균일한 벽면방사율을 가지고 있다.
- (2) 벽체의 흡수율, 반사율 및 투과율은 Kirchhoff법칙을 응용한다.
- (3) 벽체의 열전도율은 모든 벽체를 통해 균일하다.

각 벽체에서, 복사열유속방정식은 경계조건에서 계산되어지며 아래와 같은 식을 이용한다.

출사방정식

$$R_i = \epsilon \sigma T^4 + (1 - \epsilon) \sum_{j=1}^{n-1} R_j dF_{ij} \quad (i=1,2,\dots, N) \quad (5)$$

정미열유속방정식

$$q_i = \frac{\epsilon}{(1 - \epsilon)} (\sigma T^4 - R_i) \quad (i=1,2,\dots, N) \quad (\epsilon \neq 1.0) \quad (6)$$

여기서 하첨자  $i, j$ 는 각각 미소영역의 출사량 및 정미복사량의 기준점 및 목표점을 나타내고 있다. 식(5)에서 사용된 형상계수(shape factor)는 direct integral method를 이용하여 다음과 같이 사용하였다.

$$dF_{ij} = \frac{1}{2} d(\sin \theta) \quad (7)$$

여기서  $d(\sin \theta)$ 는 아래식을 이용하여 구하며 마주보는면과 교차하는 면의 두가지로 구분하였다.

마주보는 면 :

$$d(\sin \theta) = \frac{H^2}{[(X_i - X_B)^2 + H^2]^{3/2}} \quad (8)$$

교차하는 면 :

$$d(\sin \theta) = \frac{X_B Y_R}{[X_B^2 - X_R^2]^{3/2}} \quad (9)$$

식(8)과 (9)는 각각 밑면을 기준면으로 하여 기준면과 평행한 윗면과 경사진 좌측면을 목표점으로 하였다. 기준면이 이동하게 되면 식(8) 및 (9)에서  $x, y, H$ 의 값이 변화하게 된다. 하첨자  $B$ 는 기준면의 위치이며  $t$ 와  $R$ 은 목표점인 윗면과 좌측면의 위치를 나타낸다.

2.3 경계조건

모든 벽체에서 속도경계조건은 접촉(no slip) 조건을 만족하므로  $U=V=0$ 이고 온도 경계조건을 다음과 같다.

$$Y=0 : \phi_h = \phi_m + 0.5 \quad (10)$$

$$X=1 : \phi_c = \phi_m - 0.5 \text{ (for window)} \quad (11)$$

$$\text{adiabatic wall : } \frac{\partial \phi}{\partial X} = \frac{1}{N_c} Q + RK \frac{\partial \phi_a}{\partial X} \quad (12)$$

상기식은 단열면이 유한의 두께와 임의의 열전도율을 가지고 있는 경우에 적용되며 벽체열전도율이 0이면  $RK=0$ 이고 무차원 stark 수  $n_c$ 는  $\frac{\sigma T_m^3 L}{K_f}$  이 된다.  $Q$ 는 무차원복사열유속이고 그 값은  $\frac{q}{\sigma T_m^3 \Delta T}$  으로 표시한다.

### 2.4 수치해석

연구대상으로 취한 온돌공간의 모든 벽체에 서 벽면방사율이 동일하고 외부에서 일사량이 투과되지 않는 밤으로 가정하여 낮과 같이 태양에 의해 축열된 열부하가 없는 것으로 가정하였다. 본 연구의 주요변수는 벽면의 무차원 두께( $t/L$ )와 외기온도를 변수로 하여 온돌공간에 복사열전달 특성을 구하였다.

본 해석에서 사용된 계산영역은 형상비 ( $H/L$ )가 1.0이고 Grid는  $34 \times 34$ 로 비균일격자계를 사용하여 무차원 지배방정식 (1)-(4)를 체적공식화에 의해서 차분화시켰으며 차분방정식은 복사열유속방정식과 경계조건 (5)-(14)를 이용하여 SIMPLER 알고리즘<sup>8)</sup>에 의해서 수치해석하였다. 이 과정에서 안정된 해의 수렴을 위하여 하향이완계수를 사용하였다. 본 해석의 수렴조건은 고온부에서 유입되는 열량과 저온부로 유출되는 열량의 열평형 오차가 0.1%이하인 경우로 하였다.

수렴된 해로부터 다음과 같이 Nusselt수를 구하여 온돌공간의 열전달량을 계산하였다.

#### 1) 밑면의 국소 Nusselt수

$$Nu_b = - \frac{\partial \phi}{\partial Y} \Big|_{y=0} + \frac{1}{N_c} Q \quad (13)$$

#### 2) 벽체의 국소 Nusselt수

$$Nu_w = \frac{1}{\phi_w} \frac{\partial \phi}{\partial X} \Big|_{x=1} + \frac{1}{N_c} Q \quad (14)$$

#### 3) 밑면의 평균 Nusselt수

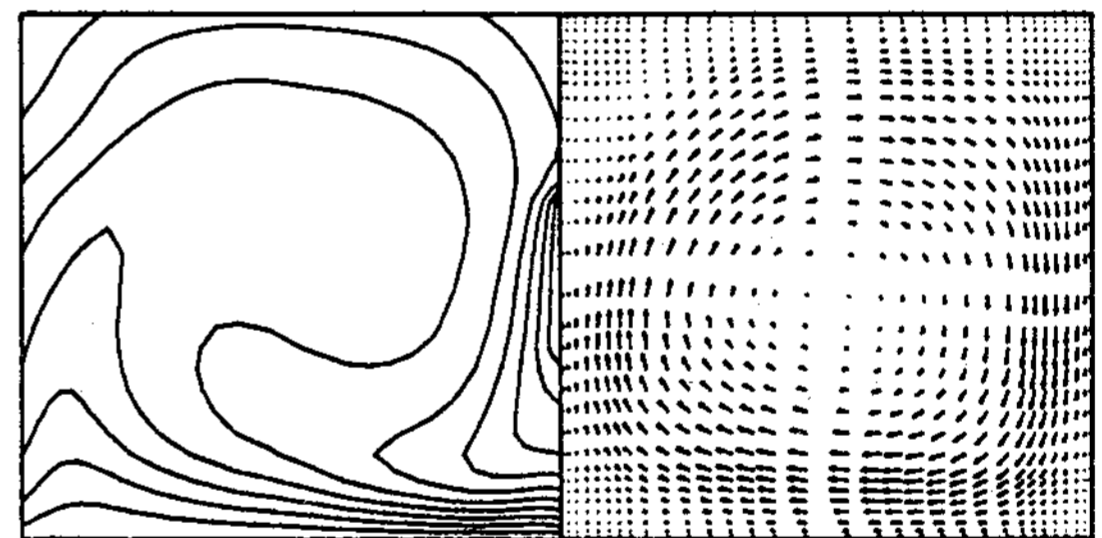
$$\overline{Nu_b} = \int_0^1 Nu_b dX \quad (15)$$

#### 4) 좌측벽체의 평균 Nusselt수

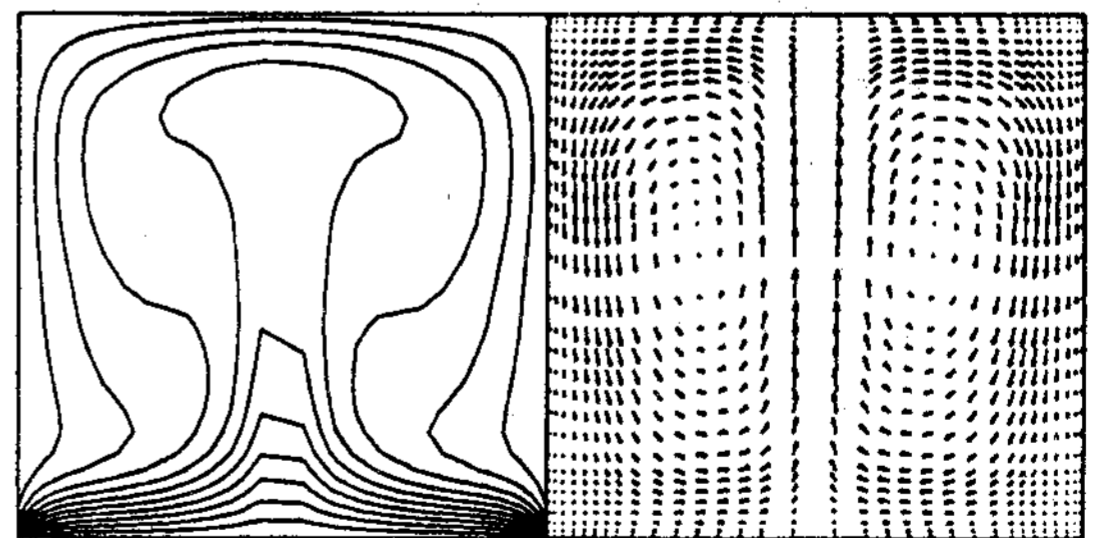
$$\overline{Nu_w} = \frac{1}{(H/L)} \int_0^{H/L} Nu_w \phi_w dX \quad (16)$$

### 3. 결과 및 고찰

Fig.2는  $Ra=1.25 \times 10^5$ , 순수자연대류인 경우, 벽체의 무차원두께  $t/L=0.01$ 과 2.0에 대한 등온선과 속도벡터분포를 나타내고 있다.



(a)  $\frac{t}{L} = 2.0$



(b)  $\frac{t}{L} = 0.01$

Fig. 2 Comparison of isotherms and velocity vector distribution for natural convection at  $Ra=1.25 \times 10^5$ ,  $Pr=0.71$

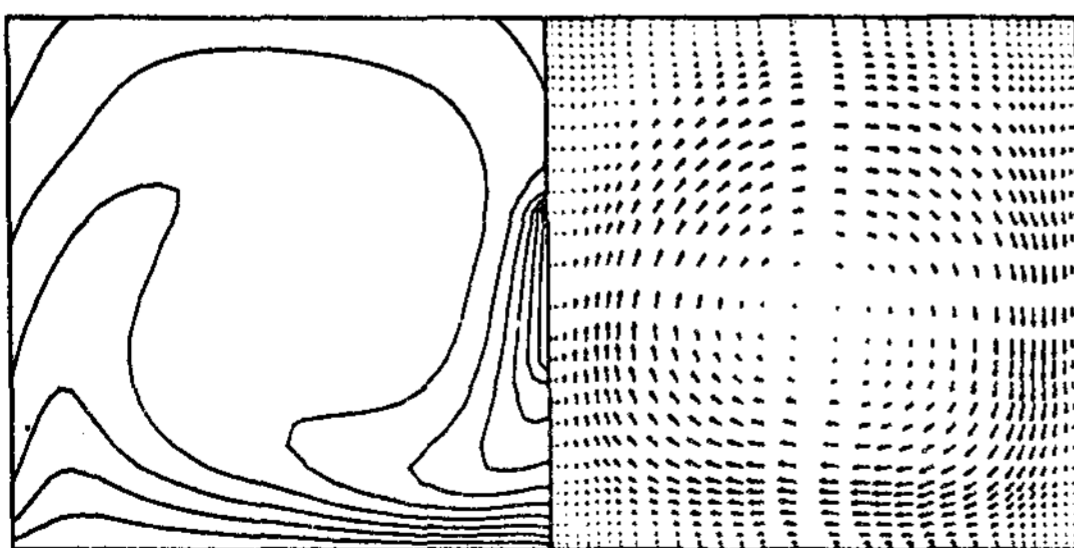
등온선분포는 벽체에서 온도구배가 존재하여 벽면을 통한 열손실을 나타내고 특히  $t/L=0.01$ 인 경우는  $t/L=2.0$ 인 경우보다 벽체의 무차원두께가 얇아 열손실이 크기 때문에 벽체의 온도분포가 거의 좌, 우대칭이 되어 다중유동(multi-cell flow)이 발생된다. 이는 공간내의 저온영역이  $t/L=2.0$ 인 경우는 외기온도의 영향을 직접받는 창문부근에서 분포하다가  $t/L=0.01$ 인 경우는 벽체의 대부분이 저온영역으로 분포되기 때문이다.

Fig.3은  $Ra=1.25 \times 10^5$ , 표면복사( $\epsilon=0.5$ )를 동반한 자연대류이며, 벽체의 무차원두께  $t/L=0.01$ 과  $2.0$ 에 대한 등온선과 속도벡터분포를 나타내고 있다. 벽체의 무차원두께의 감소에 따른 열전달특성은 순수자연대류(Fig.2)와 유사한 경향을 나타내고 있으나 복사교환에 의해 실내온도가 증가되지만  $t/L=2.0$ 인 경우가  $t/L=0.01$ 보다 현저한 증가를 나타내고 있다. 이는 벽체의 무차원두께가 감소하면 열손실이 증가되어 벽체의 온도가 감소되므로 복사교환에 의한 정미복사량이 작아지기 때문이다.

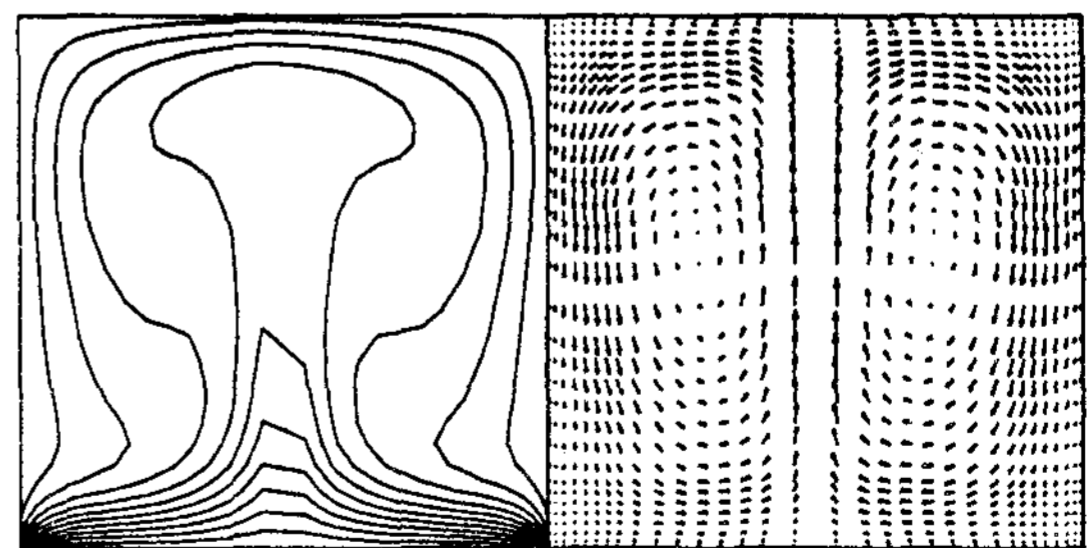
Fig.4(a), (b)는  $Ra=1.25 \times 10^5$ 인 경우, 순수 자연대류와 표면복사( $\epsilon=0.5$ )를 동반한 자연대

류에 대해 좌측벽체의 온도분포를 나타내고 있다. 좌측단열벽체의 온도분포는 벽체의 무차원두께가 감소함에 따라 고온인 밀면과 근접한 하단에서 부터 급격히 감소하다가  $t/L \leq 0.1$ 인 경우는 무차원수직거리가 변함에 따라 단열벽체의 온도분포가 유사하게 나타내고 있다.  $t/L=0.5$ 인 경우만 표면복사열 전달을 동반한 경우가 순수자연대류보다 온도분포가 미소하게 높게 나타나고 있다. 이는 벽체의 무차원두께가 얇아짐에 따라 단열벽체로의 열손실이 증가하여 정미복사량이 감소하고 단열벽체의 온도가 낮아지기 때문이다.

Fig.5는  $Ra=8.21 \times 10^4$ 이고 순수자연대류인 경우, 여러가지 무차원벽체두께( $t/L$ )에 대한 밀면의 국소 Nusselt수를 나타내고 있다. 밀면의 국소 Nusselt수는 벽체의 무차원두께변화에 관계없이 거의 좌, 우대칭형태를 나타내고 있다. 벽체의 무차원두께가 감소함에 따라 좌, 우벽체부근에서는 이 Nusselt수는 현저히 감소하지만 나머지 지점에서는 유사한 값을 나타내고 있다. 이는 벽체의 무차원두께가 감소되어 벽체의 열손실을 증가시키지만 실내의 대류열전달현상에 큰 영향을 미치지 못함을 나타내는 것이다.



(a)  $\frac{t}{L} = 2.0$



(b)  $\frac{t}{L} = 0.01$

Fig. 3 Comparison of isotherms and velocity vector distributions for surface radiation at  $Ra=1.25 \times 10^5$ ,  $Pr=0.71$  and  $\epsilon=0.5$

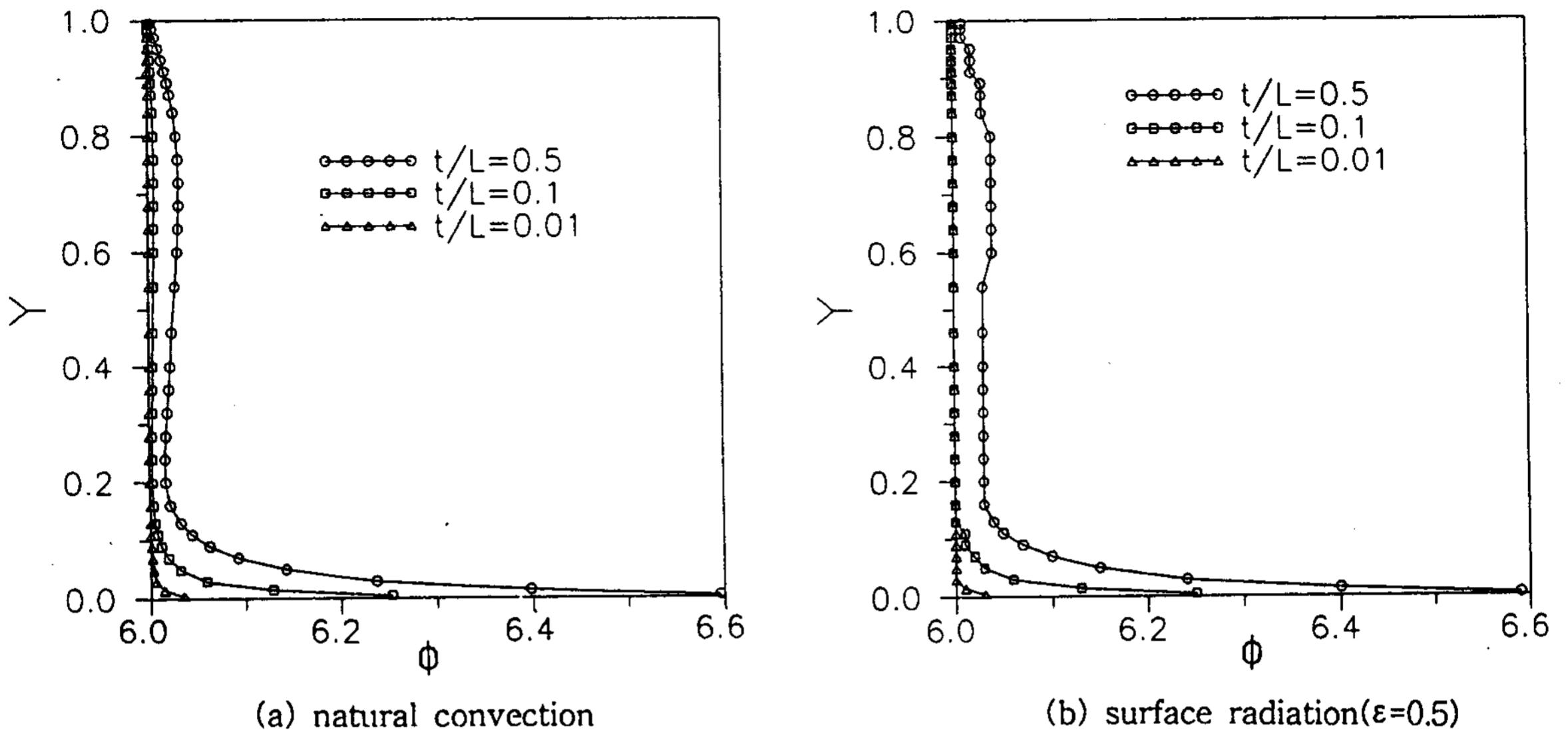


Fig. 4 Dimensionless vertical distance versus dimensionless temperature of the left adiabatic wall for various adiabatic wall thicknesses at  $Pr=0.71$ ,  $Ra=1.25 \times 10^5$

Fig.6은 Fig.5와 동일한 조건일때, 우측면저온부(창)의 국소 Nusselt수를 나타내고 있다. 우측면저온부(창)의 국소 Nusselt수는 벽체의 무차원두께에 관계없이 상부가 큰값, 하부가

작은값을 나타내며 벽체의 무차원두께가 증가함에 따라 상, 하부 Nusselt수의 차이가 증가하고 있다. 이는 벽체의 무차원두께가 증가함에 따라 단열효과를 증가시켜 밑면에서 상승

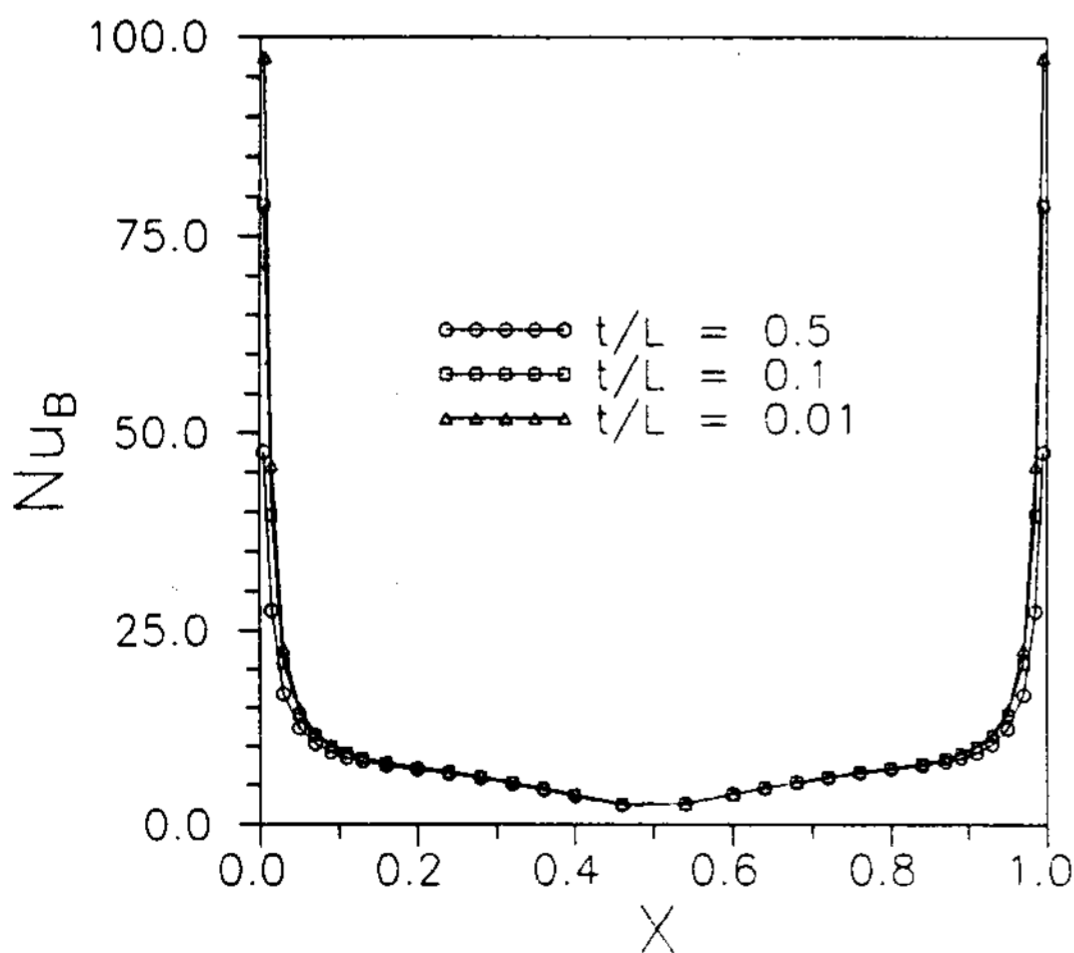


Fig. 5 Local Nusselt number of the bottom surface versus dimensionless horizontal distance for various adiabatic wall thicknesses for natural convection at  $Pr=0.71$ ,  $Ra=8.21 \times 10^4$

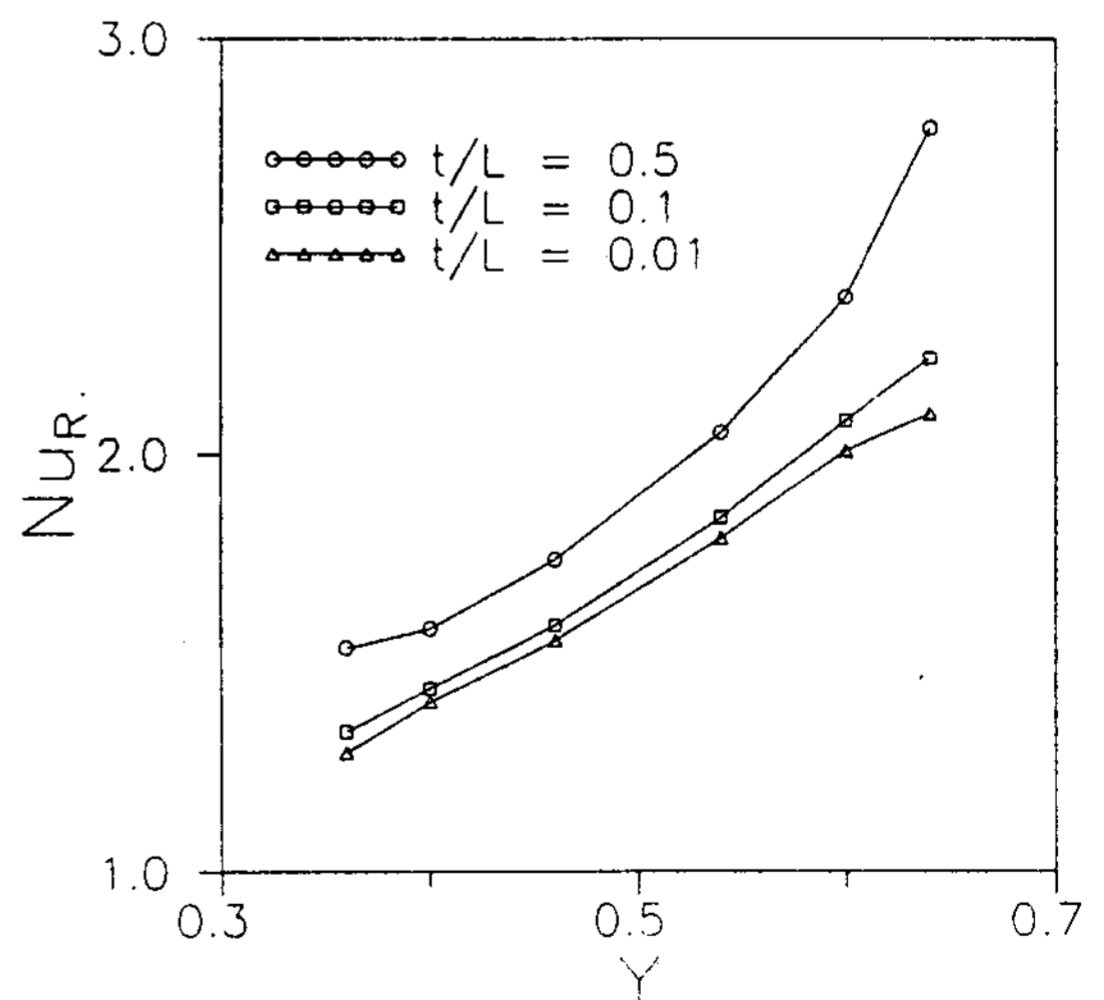


Fig. 6 Local Nusselt number of the right cold surface versus dimensionless vertical adiabatic wall thicknesses for natural convection at  $Pr=0.71$ ,  $Ra=8.21 \times 10^4$



하는 고온유체가 벽체로의 열손실을 둔화시키기 때문이다.

Fig.7은 순수자연대류이고 벽체의 무차원두께( $t/L=0.5$ )가 고정된 경우, Rayleigh수의 변화에 대한 밑면의 국소 Nusselt수를 나타내고 있다. 밑면의 국소 Nusselt수는 Fig.5와 유사한 분포를 나타내고 있다. Rayleigh수가 증가함에 따라 좌, 우벽체부근에서는 유사한 값을 나타내지만 나머지 지점에서는 미소하게 증가하고 있다. 이는 Rayleigh수가 증가함에 따라 부력효과가 커져 실내에서 대류유동을 촉진시키기 때문이다.

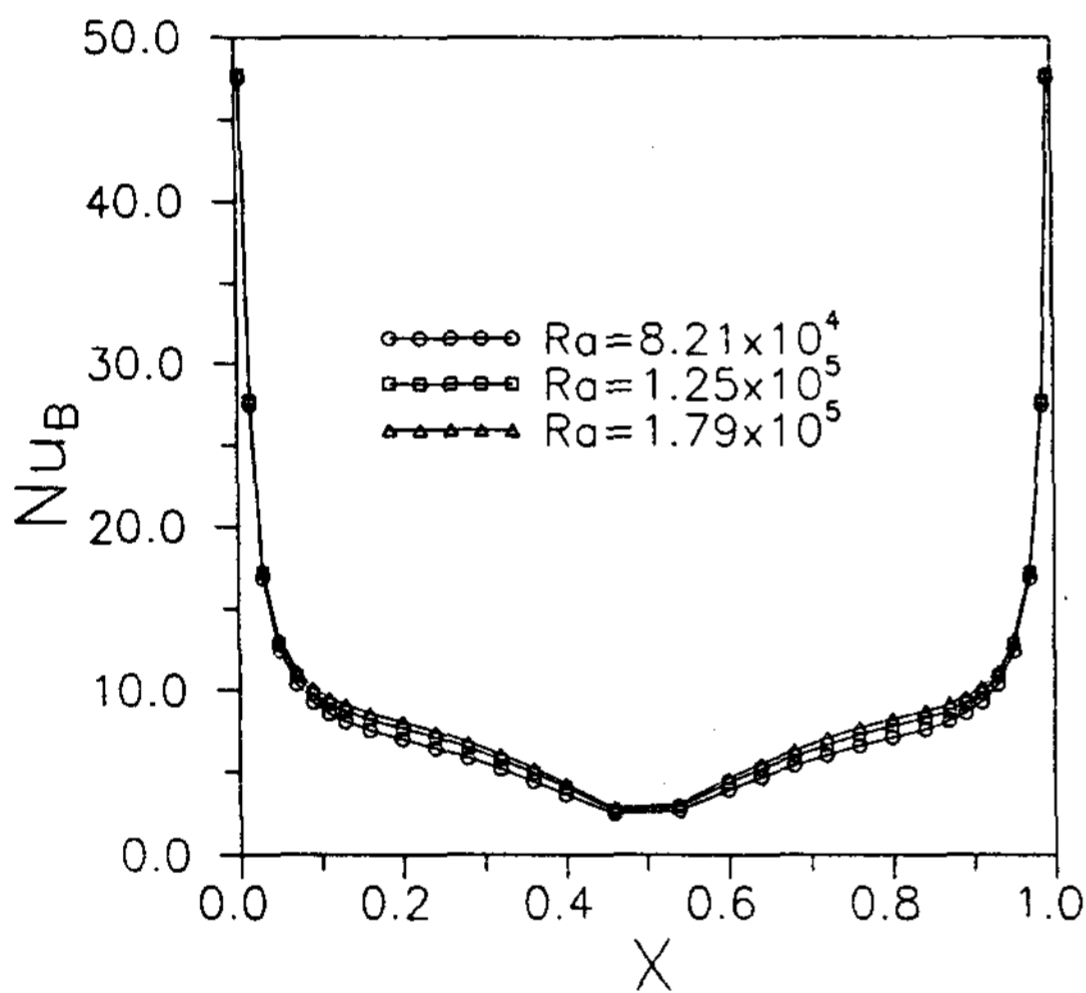


Fig. 7 Local Nusselt number of the bottom surface versus dimensionless horizontal distance for various Rayleigh numbers for natural convection at  $Pr=0.71$ ,  $t/L=0.5$

Fig.8은 순수자연대류인 경우, 여러가지 Rayleigh수 변화에 대해 무차원벽체두께( $t/L$ ) 변화에 따른 밑면의 평균 Nusselt수를 나타내고 있다. 밑면의 평균 Nusselt수는 Rayleigh수가 감소하고 벽체의 무차원두께가 증가함에 따라 벽체의 단열성이 커지고 부력의 효과가

둔화되므로 현저히 감소하고 있다. 벽체의 무차원두께와 Rayleigh수의 변화에 따른 밑면의 평균 Nusselt수의 상관식은 다음과 같이 나타내며 오차는  $\pm 2\%$ 이다.

$$\overline{Nu_B} = 1.433 \left( \frac{K_f}{k_w} \frac{t}{L} \right)^{-0.0494} (Ra)^{0.152} \quad (17)$$

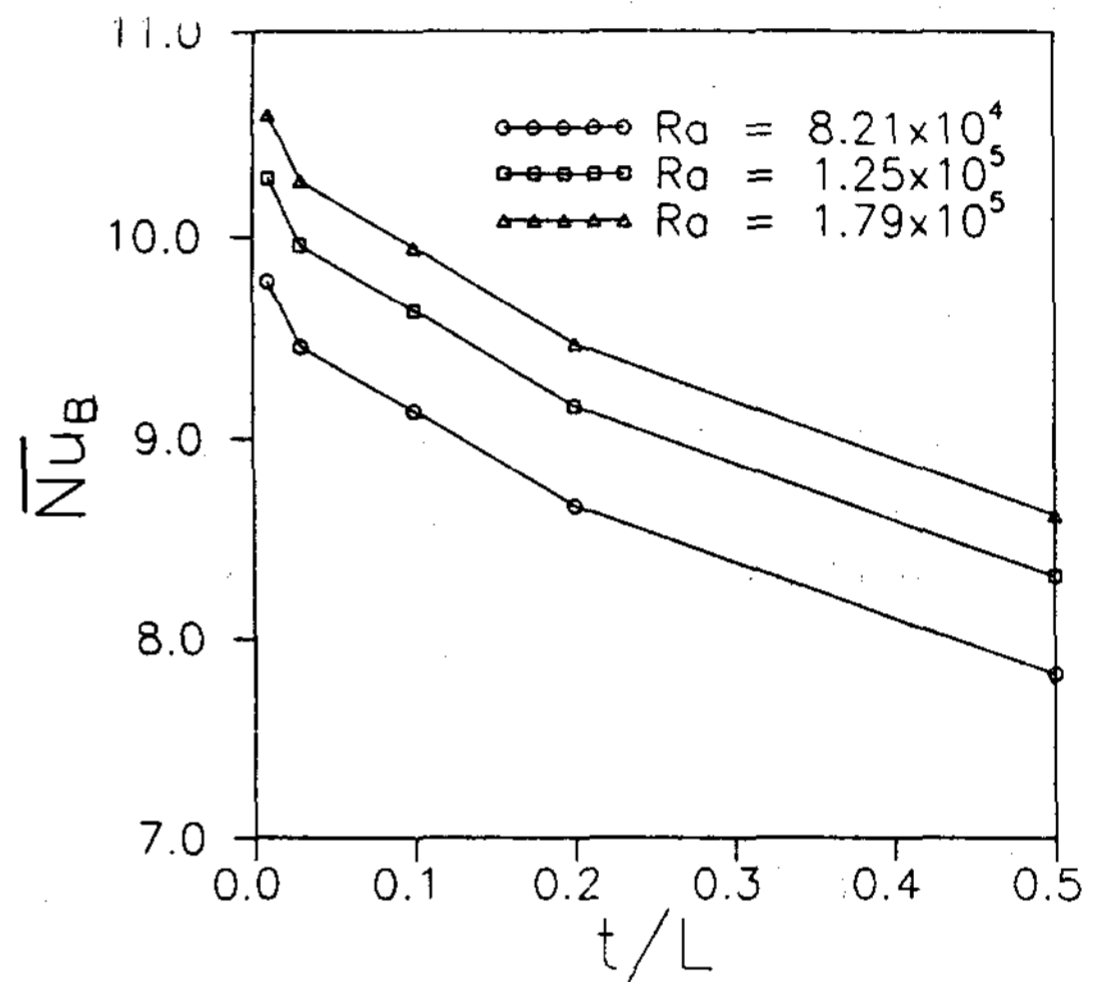


Fig. 8 Mean Nusselt number of the bottom surface versus dimensionless thickness of adiabatic wall for various Rayleigh numbers for natural convection at  $Pr=0.71$

Fig.9는 Fig.8과 동일한 조건일때, 우측면저온부(창)의 평균 Nusselt수를 나타내고 있다. 우측면 저온부(창)의 평균 Nusselt수는 Rayleigh수와 벽체의 무차원두께가 증가함에 따라 현저히 증가하고 있다. 이는 벽체의 무차원두께가 증가함에 따라 벽체의 열손실이 감소하여 우측면저온부(창)로의 열손실이 증가됨을 나타내는 것이다.

Fig.10은  $Ra=8.21 \times 10^4$ 이고 표면복사를 동반한 자연대류( $\epsilon=0.1$ )인 경우, 여러가지 벽체의 무차원두께( $t/L$ )에 대해 무차원수평거리 변화에 따른 밑면의 국소 Nusselt수를 나타내

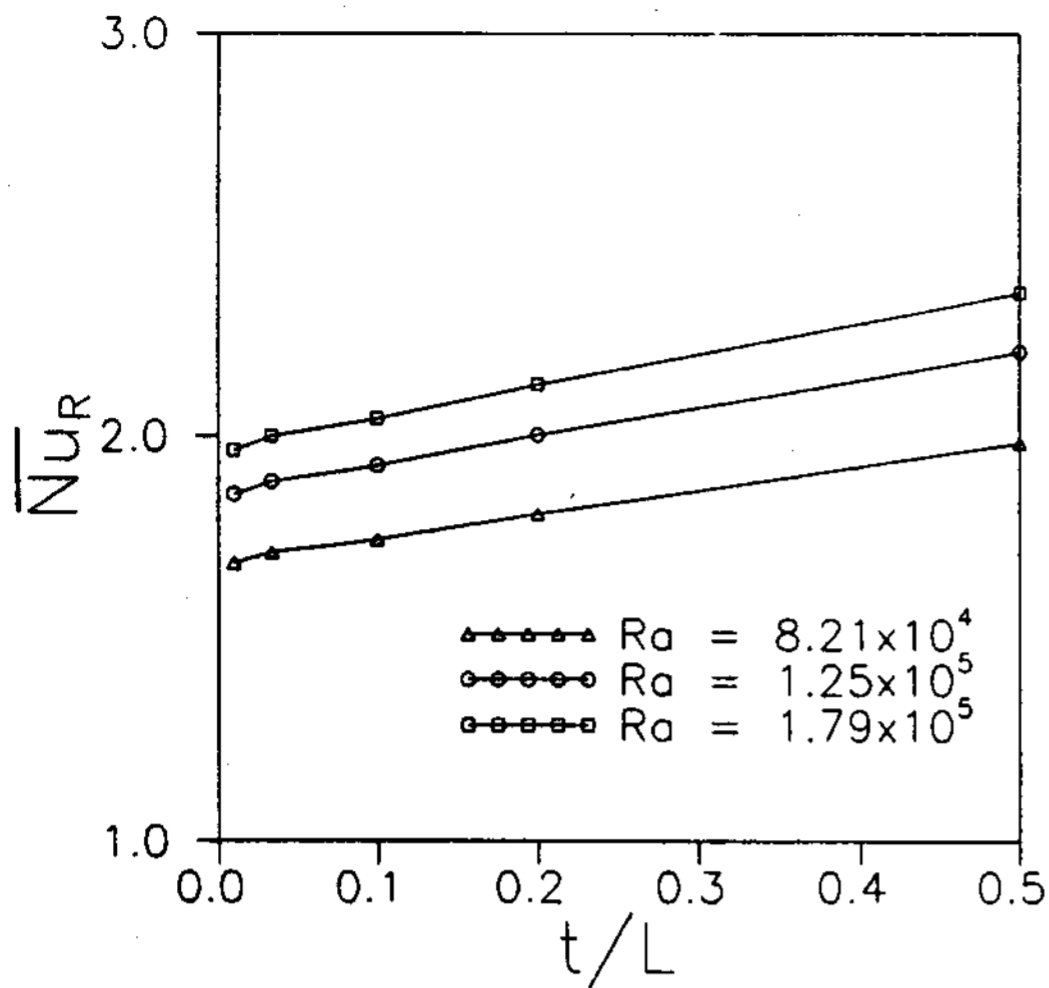


Fig. 9 Mean Nusselt number of the right cold surface versus dimensionless thickness of adiabatic wall for various Rayleigh numbers for natural convection at Pr=0.71

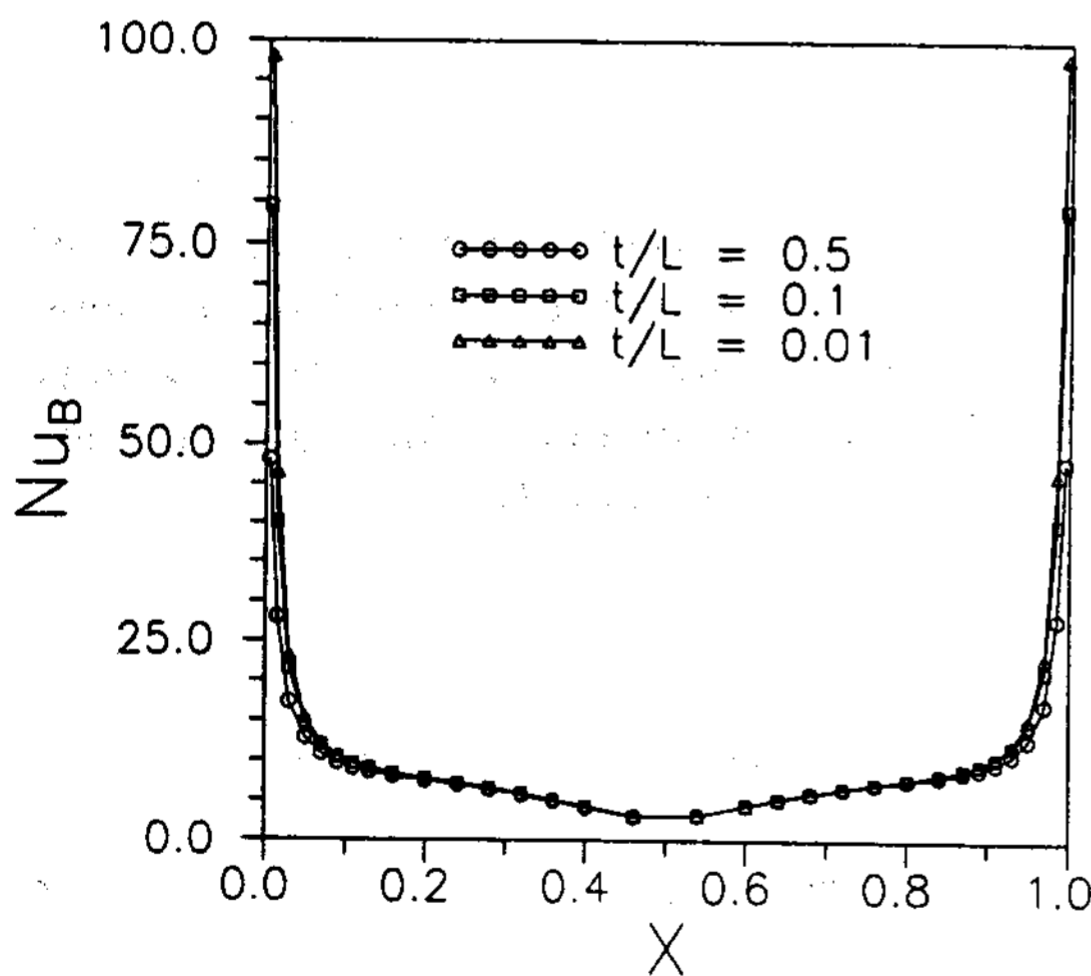


Fig. 10 Local Nusselt number of the bottom surface versus dimensionless horizontal distance for various adiabatic wall thicknesses for surface radiation at Pr=0.71,  $\epsilon=0.1$  and  $Ra=8.21 \times 10^4$

고 있다. 밑면의 국소 Nusselt수는 순수자연대류(Fig.5)보다 완벽한 좌, 우대칭의 열전달

현상을 나타내고 이 값이 순수자연대류보다 미소하게 증가하고 있다. 이는 벽체의 무차원 두께(t/L)가 변화함에 따라 복사교환에 의한 정미복사량에 의해 좌, 우벽체의 온도분포가 유사해지기 때문이다.

Fig.11은 Fig.10과 동일한 조건일 때, 우측 면저온부(창)의 국소 Nusselt수를 나타내고 있다. 우측면저온부(창)의 국소 Nusselt수는 복사교환에 의한 정미복사량에 의해 순수자연대류(Fig.6)와 유사한 열전달현상을 나타내고 있으나 이 값은 순수자연대류(Fig.6)보다 미소하게 증가하였다.

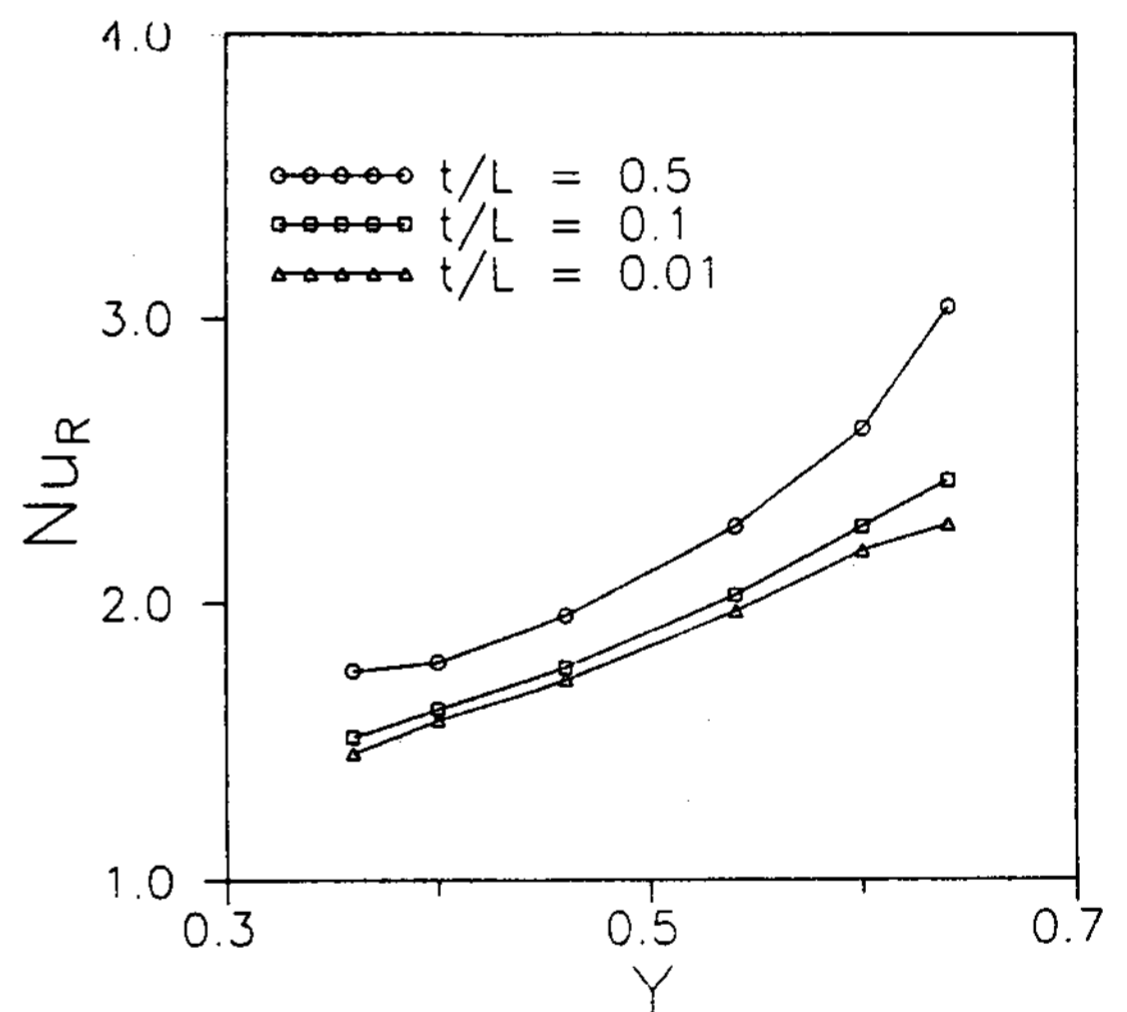


Fig. 11 Local Nusselt number of the right cold surface versus dimensionless vertical distance for various adiabatic wall thicknesses for surface radiation at Pr=0.71,  $\epsilon=0.1$  and  $Ra=8.21 \times 10^4$

Fig.12는 벽면방사율( $\epsilon = 0.1$ )이 고정된 경우, 여러가지 Rayleigh수 변화에 대해 벽체의 무차원두께(t/L)변화에 따른 밑면의 평균 Nusselt수를 나타내고 있다. 밑면의 평균 Nusselt수는 복사교환에 의한 정미복사량이

발생하여 순수자연대류(Fig.8)보다 미소하게 증가하고 있으나 벽체의 무차원두께 증가와 Rayleigh수변화에 따른 열전달특성은 순수자연대류(Fig.8)와 유사하게 나타내고 있다.

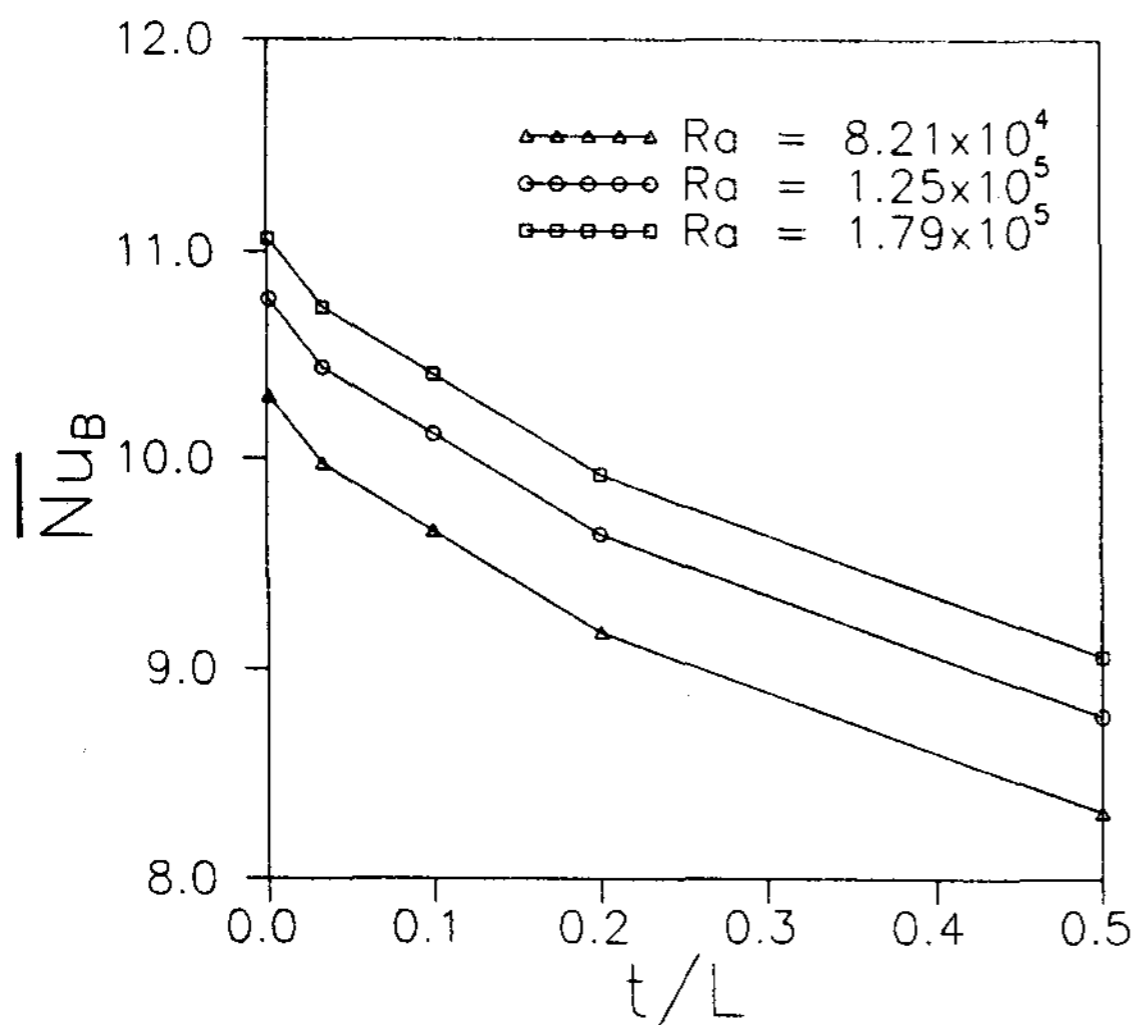


Fig. 12 Mean Nusselt number of the bottom surface versus dimensionless thickness of adiabatic wall for various Rayleigh numbers for surface radiation at  $Pr=0.71$ ,  $\epsilon=0.1$

Fig.13은 벽면방사율( $\epsilon = 0.1$ )이 고정된 표면복사인 경우, 여러가지 Rayleigh수 변화에 대해 벽체의 무차원두께( $t/L$ )변화에 따른 우측면저온부(창)의 평균Nusselt수를 나타내고 있다. 우측면저온부(창)의 평균Nusselt수는 복사교환에 의한 정미복사량이 발생하여 순수자연대류(Fig.9)보다 미소하게 열손실이 증가하였으나 벽체의 무차원두께증가와 Rayleigh수 변화에 따른 열전달특성은 유사하게 나타나고 있다.

Fig.14는 벽체의 무차원두께( $t/L = 0.5$ )와 벽면방사율( $\epsilon = 0.1$ )이 고정된 경우, 여러가지 Rayleigh수변화에 대한 밑면의 전체열유속에

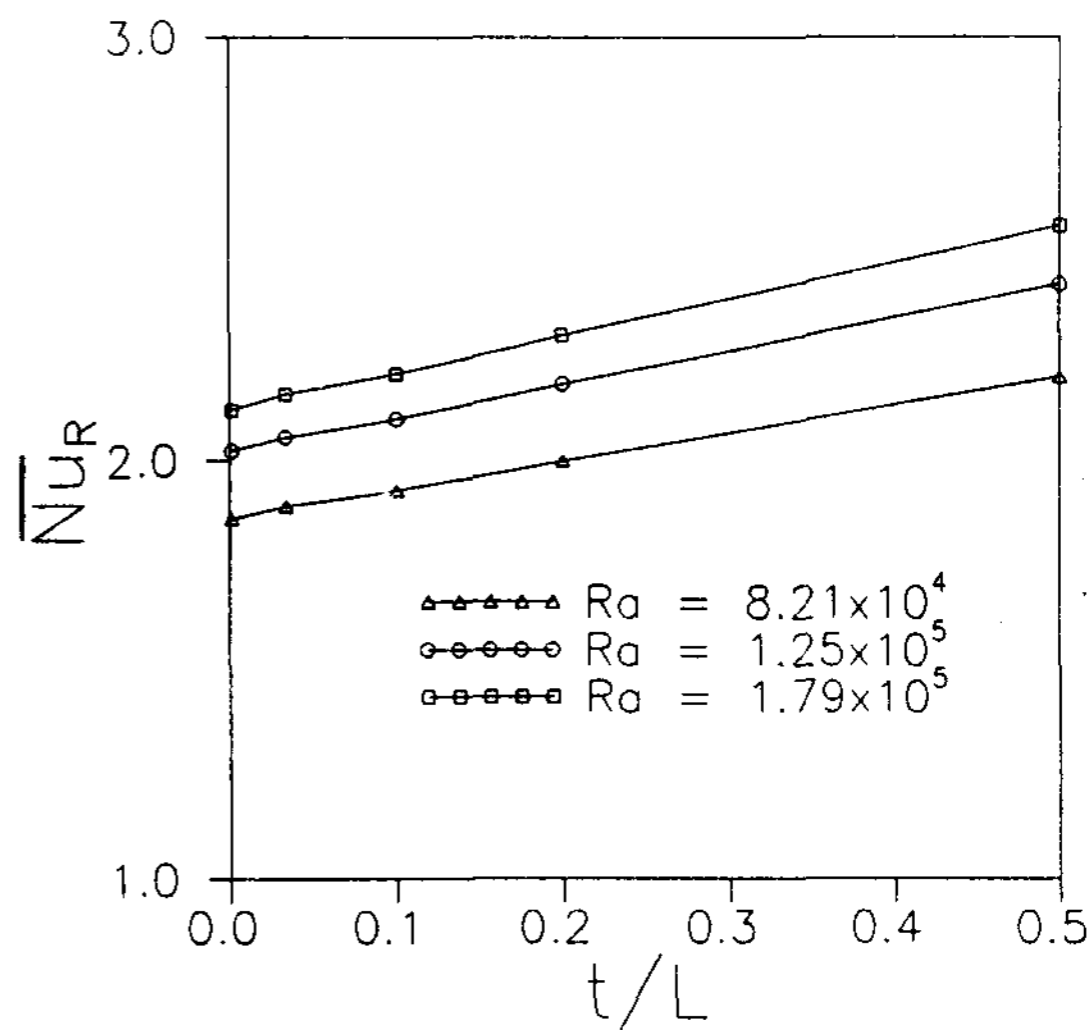


Fig. 13 Mean Nusselt number of the right cold surface versus dimensionless thickness of adiabatic wall for various Rayleigh numbers for surface radiation at  $Pr=0.71$ ,  $\epsilon=0.1$

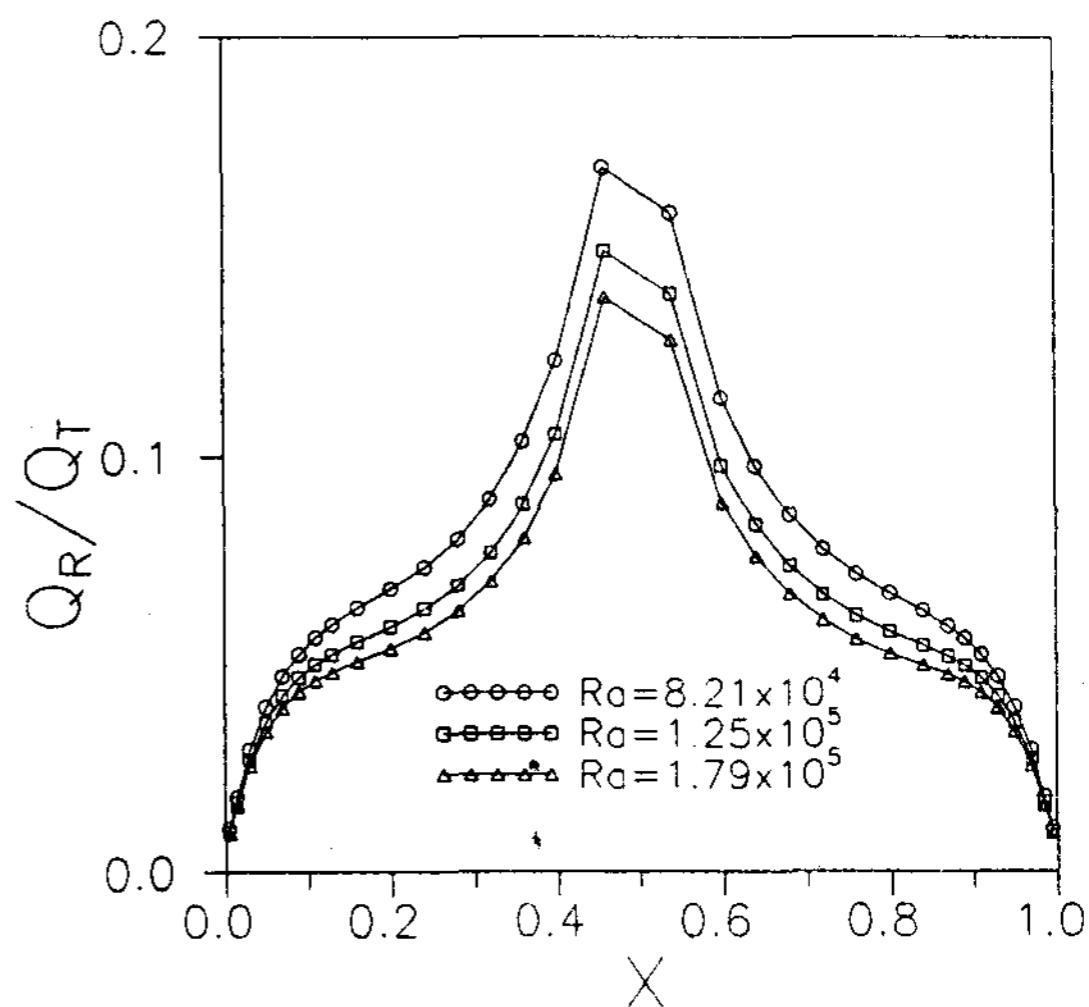


Fig. 14 Ratio of dimensionless local radiant heat flux of the bottom surface for various Rayleigh numbers for surface radiation at  $Pr=0.71$ ,  $\epsilon=0.1$  and  $t/L=0.5$

대한 복사열유속비를 나타내고 있다. 이 복사열유속비는 좌, 우벽체부근에서 급격히 감소

하며 이중 유동에 의해 대류열전달이 감소되는 중앙부근에서 현저히 증가하는 좌, 우대칭을 나타내지만 좌측이 우측보다 미소하게 높은 값을 나타낸다. 이 값은 Rayleigh수가 증가함에 따라 전체적으로 감소하고 있다. 이는 Rayleigh수가 증가함에 따라 대류열전달량과 복사열전달량이 증가하지만 대류열전달량의 증가폭이 복사열전달량의 증가폭보다 크기 때문이다.

Fig.15는 벽체의 무차원두께( $t/L = 0.5$ )와 벽면방사율( $\epsilon = 0.1$ )이 고정된 경우, 여러가지 Rayleigh수변화에 대한 우측면저온부(창)의 전체열유속에 대한 복사열유속비를 나타내고 있다. 이 값은 우측면저온부(창)의 상부보다 하부가 증가하고 있다. 이는 우측면저온부(창)에서 복사열유속이 차지하는 비율은 하향유동에 의하여 상부가 하부보다 대류열전달량이 증가하고 복사전열량이 차지하는 비율이 감소하기 때문이다. Rayleigh수가 증가함에 따라 주위벽체의 온도가 감소하여 복사교환에 의한

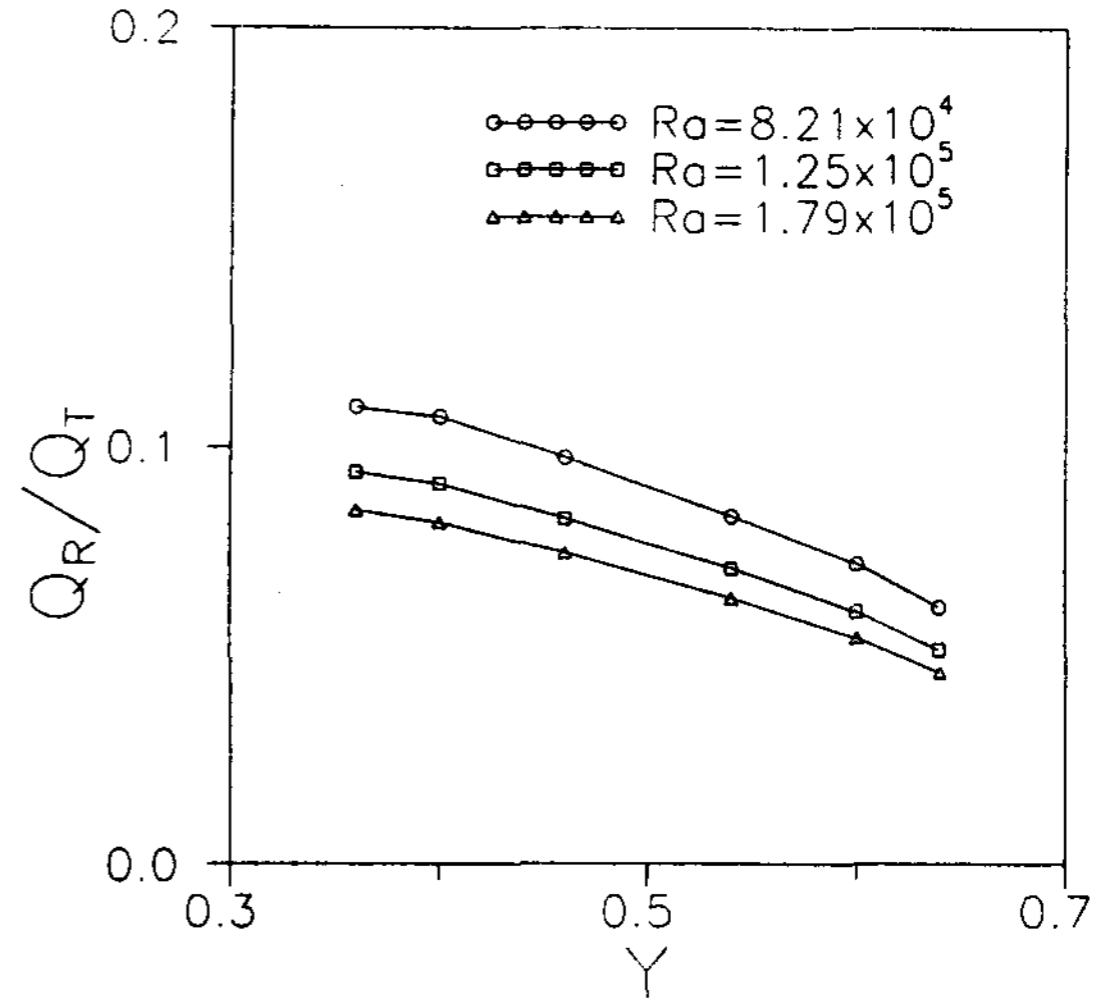


Fig. 15 Ratio of dimensionless local radiant heat flux of the right cold surface for various Rayleigh numbers for surface radiation at  $Pr=0.71$ ,  $\epsilon=0.1$  and  $t/L=0.5$

정미복사량이 감소하고 대류열전달이 증가하기 때문에 Rayleigh수 증가에 따른 이 값이 작아진다.

Table 1. Comparison of mean Nusselt numbers of the bottom surface with radiation and without radiation for  $Ra = 1.25 \times 10^5$

t/L	Nu <sub>b</sub> (with radiation)		Nu <sub>b</sub> (without radiation)	
	convection + radiation	convection only		
0.5	$\epsilon = 0.1$	8.775	8.299	8.313
	$\epsilon = 0.5$	10.832	8.223	
0.2	$\epsilon = 0.1$	9.636	9.151	9.159
	$\epsilon = 0.5$	11.785	9.113	
0.1	$\epsilon = 0.1$	10.119	9.631	9.635
	$\epsilon = 0.5$	112.309	9.611	
0.03	$\epsilon = 0.1$	10.443	9.954	9.956
	$\epsilon = 0.5$	12.656	9.942	
0.01	$\epsilon = 0.01$	10.772	10.281	10.281
	$\epsilon = 0.5$	13.003	10.278	

Table 1은 밀면의 평균 Nusselt수를 복사열 전달이 동반된 자연대류와 순수자연대류의 경우에 대하여 비교하였다. 밀면의 평균 Nusselt수는 복사열전달이 동반된 자연대류인 경우가 순수자연대류인 경우보다 큰 값을 나타내고 벽면방사율이 증가함에 따라 증가하지만 벽체의 무차원두께가 감소함에 따라 복사열 전달량의 증가폭이 미소하게 둔화된다. 그러나 밀면의 평균 Nusselt수는 복사열전달을 동반하는 자연대류의 대류열전달량이 순수자연대류의 열전달량보다 다소 감소되었다. 이는 복사교환에 의하여 발생된 정미복사량이 벽체온도를 상승하여 대류열전달을 둔화시킨 때문이다. 벽면방사율( $\epsilon$ )이 0.5이고 벽체의 무차원두께와 Rayleigh수가 변화될때 밀면의 대류열전달에 대한 평균 Nusselt수의 상관식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며 오차는  $\pm 2\%$ 이다. 식(18)을 식(17)과 비교하면 부력의 영향이 다소 둔화됨을 나타내고 있다.

$$\overline{Nu}_B = 2.21 \left( \frac{k_f}{k_w} \frac{t}{L} \right)^{-0.0537} (Ra)^{0.111} \quad (18)$$

#### 4. 결 론

온돌공간으로 가정된 2차원 밀폐공간에서 표면복사-자연대류열전달 특성에 관하여  $8.21 \times 10^4 \leq Ra \leq 1.79 \times 10^5$ ,  $Pr = 0.71$  그리고 벽체의 열전도율( $K_w/K_f$ )이 1.03일때 일사량이 없는 밤으로 가정하여 벽체의 무차원 두께( $t/L$ )를 0.01-2.0, 벽면방사율( $\epsilon$ )을 0.1-0.5로 변경하여 수치해석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 순수자연대류와 표면복사를 동반한 자연대류의 경우, 벽체의 무차원두께가 감소함에 따라 단일유동(uni-cell flow)이 이중유동(multi-cell flow)으로 변화되었

다.

- (2) 순수자연대류와 표면복사를 동반한 자연대류의 밀면, 우측면저온부(창)의 국소, 평균 Nusselt수는 표면복사를 동반한 자연대류의 경우가 순수자연대류보다 미소하게 증가하였다.
- (3) Rayleigh수가 증가함에 따라 밀면과 우측면저온부의 복사열유속비는 감소하였다.
- (4) 표면복사를 동반한 자연대류의 경우, 밀면의 평균 Nusselt수는 복사열전달을 동반하는 자연대류의 대류열전달량이 순수자연대류의 열전달량보다 다소 감소되었다.
- (5) 순수자연대류와 표면복사를 동반한 자연대류의 대류열전달량에 대한 밀면의 평균 Nusselt수에 대한 상관식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{Nu}_B = 1.433 \left( \frac{K_f}{k_w} \frac{t}{L} \right)^{-0.0494} (Ra)^{0.152} \quad (\text{without radiation})$$

$$\overline{Nu}_B = 2.210 \left( \frac{K_f}{k_w} \frac{t}{L} \right)^{-0.0537} (Ra)^{0.111} \quad (\text{with radiation})$$

#### 참고문헌

- 1) 설비기술연구회, 1994, '공조, 위생기술 데이터북', 도서출판 한미
- 2) Fusegi Toru, Farouk Bakhtier, 1988, 'Laminar and turbulent natural convection radiation interactions in a square enclosure Filled with a nongray gas', Numerical heat Transfer, PART A, Vol.15, pp.303~322

- 3) Larson. D. W and Viskanta., 1976, 'Transient Combination Laminar Free Convection and Radiation in a Rectangular Enclosure', J. of Fluid Mechanics, Vol.78, Part I, pp.65~85, 1976
- 4) Huang. J.M, Lin. J.D, 1990, 'Combined Radiation and Laminar Mixed convection in the Thermal Entrance Region of Horizontal Isothermal Rectangular Channelz', Numerical Heat Transfer, PART A, Vol.18, pp.113~125
- 5) Meyer, B.A, Mitchell. J.W and El-Wakil. M.M, 1982, 'The effect of Thermal Properties on Natural Convection in Inclined Rectangular Cells', J. of heat Transfer, Vol.104, pp.111~117
- 6) Lage. J.L, Lim. J.S and Bejan.A, 1992, 'Natural Convection with Radiation in a Cavity with open Top End', J. of Heat Transfer, Vol.114, pp.479~486
- 7) Siegel, R, and Howell, J.R., 1981, 'Thermal Radiation Heat Transfer', McGraw-Hill, 2nd edition
- 8) S.V. Patankar, 1981, 'Numerical Heat Transfer and Fluid Flow', Hemisphere, washington DC

## **A Study on the Heat Transfer Characteristics of Surface Radiation-Natural Convection Interactions in an Enclosure for Various Adiabatic Wall Thicknesses**

**Y.I. Kwon\* · J.O. Yoo\* · S.S. Kwon\*\***

### **Abstract**

This study is investigated numerically on the heat transfer characteristics of surface radiation-natural convection interactions in a two dimensional enclosure assumed Ondol cavity.

Mean Nusselt number of the bottom surface with surface radiation is increased by increasing wall emissivity and by decreasing dimensionless thickness of adiabatic wall. and is greater than that without radiation.

Mean Nusselt number of the bottom surface for convection only with surface radiation is slightly smaller than that without surface radiation with decrease dimensionless thickness of adiabatic wall.