

〈論 文〉

# 정사각형 밀폐공간내에서의 자연대류와 표면복사의 수치해석

권용일\* · 권순석\*\*

(1992년 2월 26일 접수)

## Numerical Analysis of Natural Convection and Surface Radiation in a Square Enclosure

Y.I. Kwon and S.S. Kwon

**Key Words :** Surface Radiation(표면복사), Transparent Window(투명한 창), Net Radiation Method(정미복사 법), Crossed String Method(교차선 법)

### Abstract

This investigation is carried out numerically for the two dimensional natural convection and surface radiation heat transfer in a square enclosure. The bottom and top walls are isothermal at hot and cold temperatures respectively whereas the left and right side walls are adiabatic except a transparent window on the right side partially. The exchange of radiant energy is obtained by the net radiation method and the shape factor by the crossed string method. The changes in temperature and Nusselt number distributions of the walls due to the surface radiation and insolation are also investigated.

### 기 호 설 명

$A$  : 총 방사율(overall emittance)

$F$  : 형상계수(shape factor)

$g$  : 중력 및 조사(irradiosity)

$G$  : 무차원 조사( $g/\sigma_m^3 \Delta t$ )

$H$  : 밀폐공간의 수직방향길이

$J^*$  : 출사(radiosity)

$J$  : 무차원 출사( $J^*/\sigma_m^3 \Delta t$ )

$k$  : 유체의 열전도율

$L$  : 밀폐공간의 수평방향길이

$N$  : 수정된 Stark수( $k/\sigma_m^3 L$ )

$n$  : 미소 벽면개수

$Nu$  : Nusselt수

$Pr$  : Prandtl수( $\nu/a$ )

$p$  : 압력

$P$  : 무차원 압력( $p/\rho(\nu/L)^2$ )

$q$  : 일사에너지

$Q$  : 무차원 일사에너지( $q/\sigma_m^3 \Delta t$ )

$Ra$  : Rayleigh수( $g\beta L^3(t_h - t_c)/\nu a$ )

$R$  : 총 반사율(overall reflectance)

$t$  : 온도

$T$  : 총 투과율(overall transmittance)

$u$  : 수평방향 속도

$U$  : 무차원 수평방향 속도( $uL/\nu$ )

$v$  : 수직방향 속도

$V$  : 무차원 수직방향 속도( $vL/\nu$ )

$x$  : 수평방향 좌표

$X$  : 무차원 수평방향 좌표( $x/L$ )

$y$  : 수직방향 좌표

$Y$  : 무차원 수직방향 좌표( $y/L$ )

\*정회원, 동아대학교 기계공학과 대학원

\*\*정회원, 동아대학교 기계공학과

- $\alpha$  : 열확산계수  
 $\beta$  : 열팽창계수  
 $\epsilon$  : 방사율  
 $\nu$  : 동점성계수  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 상수  
 $\emptyset$  : 무차원 온도( $t/(t_h - t_c)$ )  
 $\emptyset_m$  : 무차원 평균온도( $(t_n + t_c)/(2(t_h - t_c))$ )

### 참치자

- : 평균  
 \* : 유차원

### 하첨자

- $B$  : 밀면  
 $c$  : 저온면  
 $h$  : 고온면  
 $i$  : 복사의 미소영역 기준면  
 $j$  : 복사의 미소영역 목표면  
 $m$  : 평균값  
 $l$  : 창문의 길이  
 $T$  : 윗면

## 1. 서 론

정사각형 밀폐공간내의 자연대류 열전달에서 수직면의 한쪽은 가열되고 반대쪽은 냉각되며 상, 하가 단열면인 경우, 즉 수평방향의 균일한 온도구배가 존재하는 유체내에서의 유동과 온도분포에 대한 연구가 많이 있다.<sup>(1-3)</sup>

이들 연구의 공통점은 복사열전달을 무시한 자연대류에 관한 연구들이었다. 그러나 공학적으로 태양열집열기와 축열조의 내부유동은 복사가 대류와 강력하게 상호작용하여 공간내부의 온도분포를 변화시키며 내부온도의 상승으로 속도를 증가시키기 때문에 복사열전달의 영향을 받아 밀폐공간내부의 열전달 현상이 현저히 증가된다.

정사각형 밀폐공간에서 복사열전달이 존재하는 자연대류에 관하여 최근에 많은 연구가 수행되어지고 있다.

박명식 등<sup>(4)</sup>은 수직면이 등온이고 상, 하면이 단열인 온도경계조건일때 정사각형 밀폐공간내부의 중앙부근에 3개의 단열분리판이 존재하는 경우, 분

리판 간격비를 변수로하여 복사열전달 간섭을 연구하였다. 정미복사방법을 사용하여 복사량을 구하고 표면복사와 순수자연대류를 비교 고찰하였다. 김용진 등<sup>(5)</sup>은 복사열전달 계산방법의 하나인 정미복사방법(net radiation method)을 온돌난방에 적용시키는 방법을 소개하고 이 방법을 이용하여 온돌에서의 방열량을 구하였으며 온돌의 복사 열전달량은 방열량의 60~70%까지 차지함을 보고 하였다. 온돌난방의 공간을 2차원화한 정사각형 밀폐공간은 밀면이 고온, 윗면이 저온인 형태가 되고 좌측면, 우측면일부가 단열이며 우측면 일부는 환기를 위해 설치한 창문을 저온부로 가정할 수 있다.

내부의 유체매질은 복사에 대하여 투명한 공기이므로 표면복사만 존재하는 온돌공간은 낮시간에 투명한 창을 통과하는 일사에너지에 의해 각면에서 조사량이 증가한다. 이러한 경우, 공학적인 관점에서 온돌공간의 복사에너지의 입사형태는 일사에너지에 의해 낮과 밤으로 구분 할 수 있다. 표면복사현상을 고찰하면 저온면과 고온면은 복사교환(조사, 출사)을 통하여 열전달이 증대되며 유동강도와 내부의 저온면 온도분포는 자연대류와 비교하여 현저히 증가한다.

본 연구에서는 정사각형 밀폐공간에서 밀면과 윗면이 각각 고온과 저온부이고 좌측, 우측면일부가 단열이며 우측면 일부는 저온부인 온돌공간으로 가정하였다. 일사에너지가 우측면 저온부(창)으로 통과된 경우와 통과되지 않는 경우의 표면복사와 자연대류에 관하여 연구하였다. 그리고 창에서 일사에너지가 존재하는 표면복사의 경우는 표면복사와 구별하기 위하여 일사복사로 취급 하였다.

표면복사 열전달을 해석하기 위해서는 Hottel<sup>(6)</sup>에 의해 고안된후 보완 발전된 정미복사방법(net radiation method)<sup>(7)</sup>을 이용하여 벽면에서의 정미복사량을 구하였으며 형상계수(shape factor)를 구하기 위하여 교차선방법(crossed string method)을 이용하였다.

## 2. 이론 해석

### 2.1 지배방정식 및 경계조건

연구대상으로 취한 정사각형 밀폐공간의 기하학적형상은 Fig. 1과 같다. 밀면은 고온부로 등은  $t_h$ , 윗면과 우측면의 중앙부분은 저온부로 등은  $t_c$ 이며

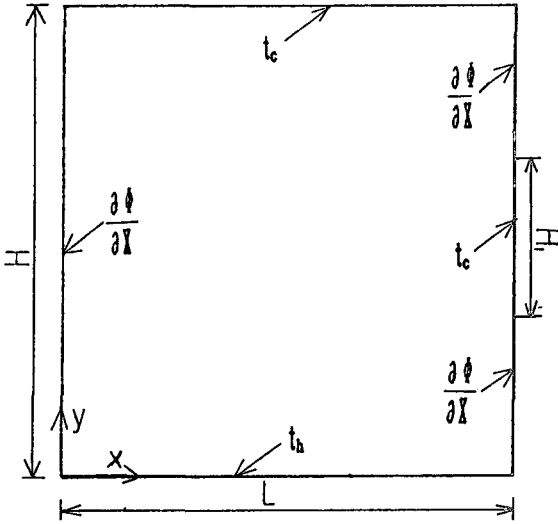


Fig. 1 Schematic of the geometry investigated

좌측면과 우측의 상, 하면은 단열면으로 가정하였다. 우측면 저온부의 무차원 수직길이 ( $H_1/L$ )는 0.33으로 고정하였다. 이 저온부는  $Y=0.33\sim 0.66$  사이에 위치되어 있다. 밀폐공간의 내부유체는 공기이고 유체의 모든 물성치는 고온부와 저온부의 평균온도를 기준으로 하였다. 공간내의 모든 표면은 복사사에 대하여 흑체 및 회체로 가정하며 일사복사의 경우는 공간내의 모든 표면은 흑체로 가정하였다.

본 연구에서 유동은 2차원 정상 층류유동이고 유체는 비압축성 뉴톤유체이다. 부력항에서 나타나는 밀도변화 이외의 모든 물성치는 일정하며 에너지 방정식에서의 열소산항은 무시한다. 이와 같은 조건에서 무차원 변수를 이용하여 지배방정식을 다음과 같이 무차원화 하였다.

연속 방정식

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

운동량 방정식

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

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

$$+ \frac{Ra}{Pr} (\phi - \phi_m) \quad (3)$$

에너지 방정식

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

식 (3)에서  $\phi_m$ 은 밀폐공간 내부의 산술 평균온도를 나타낸다.

## 2.2 경계 조건

### (1) 속도 경계조건

모든벽면에서의 속도경계조건은 점착(no slip) 조건을 만족하므로  $U=0, V=0$ 이다.

### (2) 온도 경계조건

$$Y=0 : \phi_h = \phi_m + 0.5 \quad (5)$$

$$Y=1 : \phi_c = \phi_m - 0.5 \quad (6)$$

$$X=1, 0.33 \leq Y \leq 0.66 : \phi_c = \phi_m - 0.5 \quad (7)$$

$$X=0, X=1 \text{이고 단열면인 경우 : } \frac{\partial \phi}{\partial X_i} = \frac{1}{N} (G_i - J_i) \quad (8)$$

여기서  $J_i$ 와  $G_i$ 는 각각 미소영역 기준면의 무차원 출사와 조사를 나타내고 있다. 그리고 다음과 같은 가정하에서 경계조건이 성립한다.

(1) 반사율, 흡수율 및 방사율은 파장이나 온도와 방향에 따라 영향을 받지 않는다.

(2) 임의의 미소면에서의 조사와 출사는 균일하다.

(3) 일사될때 우측면 저온부(창)의 온도는 전체적으로 균일하고 일사에너지는 방향성을 가지고 있지 않다.

### (가) 표면 복사

표면복사에서 출사와 조사에 대한 관계식을 나타내고 있다.

$$\sum_{j=1}^n (\delta_{ij} + (\epsilon_i - 1) F_{ij}) J_j = \epsilon_i (\phi_i^4 / \phi_m^3) \quad (9)$$

여기서  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$

$$G_i = \sum_{j=1}^n J_j F_{ji} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

### (나) 일사 복사

우측 저온부를 제외한 면에서의 출사와 조사에 대한 관계식은 윗식과 같고 우측 저온부에서의 일사에너지를 고려한 출사에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^n (\delta_{ij} + R_i F_{ij}) J_j = A_i (\Phi_i' / \Phi_m^3) + T_i Q \quad (11)$$

여기서 하첨자  $i, j$ 는 각각 미소영역의 출사와 조사에 대한 기준점과 목표점을 나타내고  $R, T, A$ 는 우측저온부(창)에서 복사에너지의 총 반사율, 투과율, 방사율을 각각 나타내고 있다.

2.3 수치 해석

연구 대상으로 취한 정사각형 운동공간 내부에서 방사율이 변수가되는 표면복사의 경우는 각면에서 방사율이 일정하며 밤으로 가정하여 방사율( $\epsilon$ )이 변수가되는 식(9), (10)식을 이용하여 정미복사량을 구하고 복사효과를 Fig. 3~Fig. 8에 나타내었다. 일사복사의 경우는 낮으로 가정하여 우측 저온부(창)의 총 투과율이 1.0인 이상적인 경우에 무차원 일사에너지( $Q$ )가 변수가 되는 식(10), (11)을 이용하여 정미복사량을 구하고 복사효과에 대하여 Fig. 9~Fig. 14를 나타내었다. 이 결과로서 복사가 고려된 경우와 자연대류의 열전달 특성을 비교 고찰하였다.

본 해석의 직각 계산영역은 형상비(H/L)가 1.0이므로 격자는  $34 \times 34$ 로 하여 무차원 지배방정식(1)~(4)를 체적 공식화에 의해서 차분화시켰으며 차분 방정식은 경계조건(5)~(11)을 이용하여 SIMPLE알고리즘에 의해서 수치해석하였다. 이 과정에서 안정된 해의 수렴을 위하여 이완계수는 속도, 압력 및 온도에 대하여 0.3, 0.5 및 0.8을 사용하였다.

본 해석의 수렴조건은 고온부에서 유입되는 열량과 각 저온부로 유출되는 열량의 열평형 오차가 0.01%이하 일때로 하였다.

Nusselt수는 수렴된 해로부터 다음과 같이 구하였다.

- (1) 밑면 국소 Nusselt수

$$Nu_B = \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \Big|_{Y=0} + \frac{1}{N} (J_i - G_i) \quad (12)$$

- (2) 윗면 국소 Nusselt수

$$Nu_T = \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \Big|_{Y=1} + \frac{1}{N} (G_i - J_i) \quad (13)$$

- (3) 밑면, 윗면의 평균 Nusselt수

$$\overline{Nu}_B = \int_0^1 Nu_B dX, \quad \overline{Nu}_T = \int_0^1 Nu_T dX \quad (14)$$

- (4) 우측면 국소 Nusselt수

$$Nu_R = \frac{\partial \Phi}{\partial X} \Big|_{X=1} + \frac{1}{N} (G_i - J_i) \quad (15)$$

- (5) 우측면 평균 Nusselt수

$$\overline{Nu}_R = \frac{1}{0.33} \int_{0.33}^{0.66} Nu_R dY \quad (16)$$

3. 결과 및 고찰

본 연구에서의 고찰범위인  $4.6 \times 10^3 \leq Ra \leq 1 \times 10^6$ ,  $Pr = 0.69$ 일때  $2.7 \leq Q \leq 8.5$ 인 경우의 일사복사와  $0.0 \leq \epsilon \leq 1.0$ 인 경우의 표면복사 및 자연대류의 열전달 현상과 유동 특성은 다음과 같다.

Fig. 2는  $Ra = 1.25 \times 10^5$ 일때 순수자연대류, 표면복사 및 일사복사에 대한 등온선과 유선을 각각 (a), (b) 및 (c)에 나타내었다. 등온선은 복사교환에 의한 출사, 조사량이 증가하여 표면복사가 자연대류 보다 각 등온면 부근에서 온도분포가 조밀

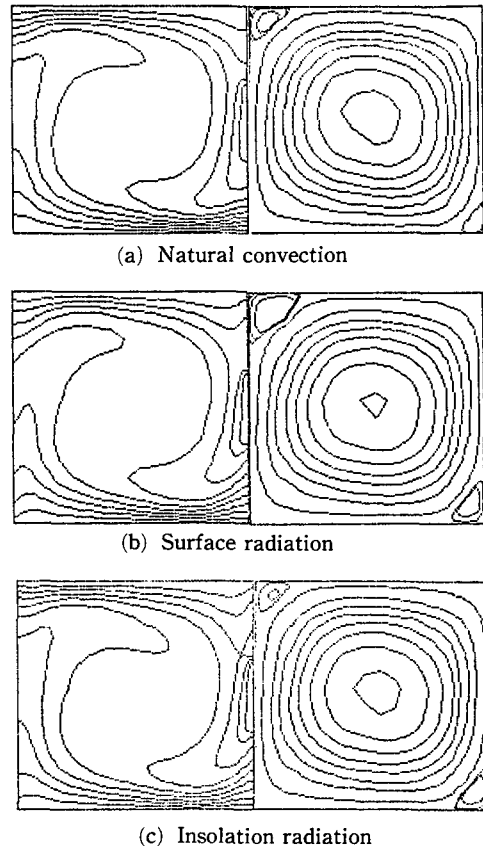


Fig. 2 Isotherms and streamlines at  $Gr = 1.25 \times 10^5$ ,  $Pr = 0.69$ ,  $\epsilon = 1$

하고 단열면 부근에서 급격한 온도구배를 나타내고 있다. 그러나 일사복사의 경우는 저온부를 제외한 면에서의 일사에너지에 의한 정미복사량이 감소하여 특히 고온인 좌측 단열면에서 온도분포가 표면 복사보다 급격히 증가한다. 유선은 모든 경우에서 우측 저온부에 의한 영향으로 시계방향으로 유동하며 특히 표면(일사)복사의 경우가 윗, 밑면의 좌, 우측 부근에서 2차유동이 활발하게 형성되고 있다. 이는 그 부근면이 상대적으로 저온이므로 조사량 증가로 인하여 온도가 상승하고 주위 유체의 상호 작용 하기 때문이다.

Fig. 3은  $Ra=1.25 \times 10^5$ , 표면복사일때 여러가지 방사율에 관하여 무차원 수평거리에 대한 국소 밑면 Nusselt수  $Nu_B$ 를 나타내고 있다.

순수 자연대류( $\epsilon=0.0$ )인 경우,  $Nu_B$ 는 우측 저온부에 의해 냉각되어진 유체가 도달하는 우측면부근( $X \approx 0.72$ )에서 최대가 되고 이 유체가 시계방향으로 유동하여 가열되어 좌측면에 이르기까지 현저히 감소됨을 나타내고 있다. 방사율이 증가함에 따라, 좌측면과 우측면에서 복사에너지의 출사, 조사량이 증가하여 각면의 부근에서  $Nu_B$ 가 급격히 증가하고 그 값이 거의 유사하게 나타나고 있다. 이

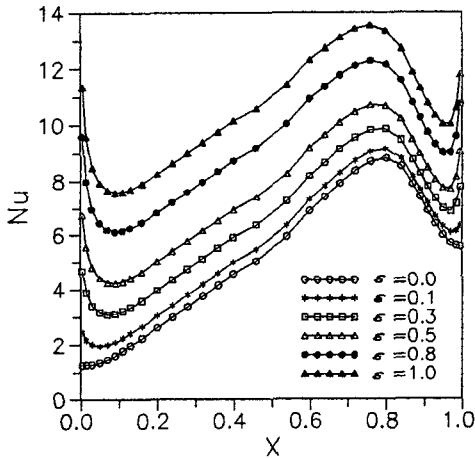


Fig. 3 Local Nusselt number at the bottom surface versus dimensionless horizontal distance for various emissivities at  $Pr=0.69$ ,  $Ra=1.25 \times 10^5$

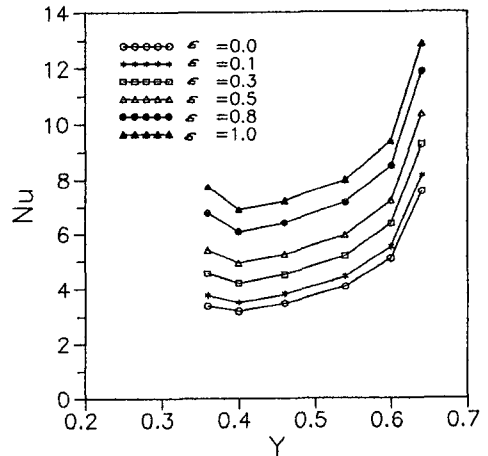


Fig. 5 Local Nusselt number at the right surface versus dimensionless vertical distance for various emissivities at  $Pr=0.69$ ,  $Ra=1.25 \times 10^5$

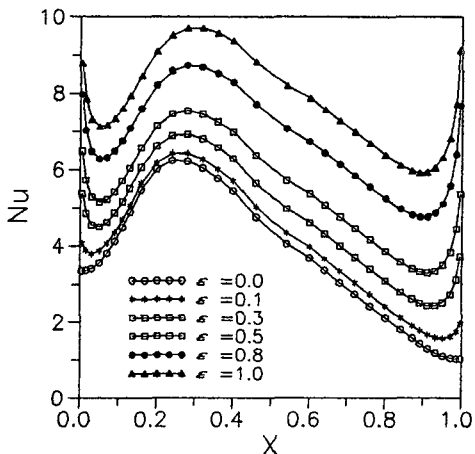


Fig. 4 Local Nusselt number at the top surface versus dimensionless horizontal distance for various emissivities at  $Pr=0.69$ ,  $Ra=1.25 \times 10^5$

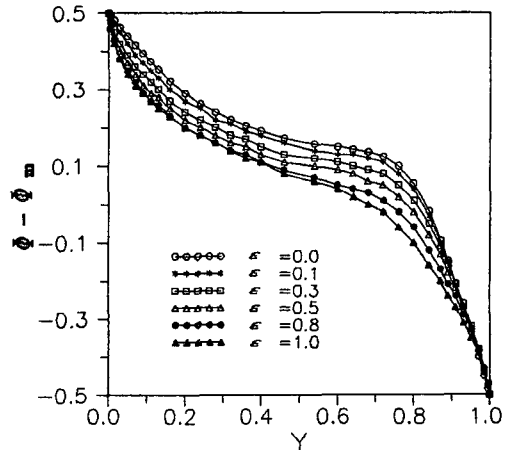


Fig. 6 Local temperature of the left surface versus dimensionless vertical distance for various emissivities (at  $Pr=0.69$ ,  $Ra=1.25 \times 10^5$ )

영향으로 우측 부근에서 2차유동이 형성되어 열전달의 최대값이 미소하게 좌측으로 이동하고 있다.

Fig. 4는 조건이 Fig. 3과 동일한 경우 국소 윗면 Nusselt수  $Nu_T$ 를 나타내고 있다. 밑면에서 가열되어진 유체가 좌측면을 따라 상승하므로 전체적으로 열전달값은  $X \approx 0.25$ 에서 최대값을 나타내며 방사율이 증가함에 따라 최대값은 미소하게 우측으로 이동하고 있다. 이는 방사율이 증가함에 따라 윗면, 좌측면 윗부분으로의 조사량이 증가하여 2차유동이 형성되기 때문이다. 방사율이 증가함에 따라 단열면 부근에서 Fig. 3과 같이 열전달량이 급격히 증가하며 특히 좌측면보다 상대적으로 저온인 우측 단열면에서 조사량이 증가하여 주위유체에 영향을 주어 열전달량이 더욱 증가한다.

Fig. 5는 조건이 Fig. 3과 동일한 경우 국소 우측면 Nusselt수  $Nu_R$ 을 나타내고 있다. 방사율이 증가함에 따라  $Nu_R$ 은 증가하고 그 최대값이 현저히 증가하며 각조건인 최소값은  $Y \approx 0.4$ 지점에서 나타나고 있다. 이는 방사율의 증가에 따른 우측저온부로의 조사량의 증가로 인한 대류 열전달이 촉진되고 유체가 하부로 이동하면서 가열됨으로 열전달이 둔화되기 때문이다.

Fig. 6은  $Ra=1.25 \times 10^5$ 일때 여러가지 방사율에 관하여 무차원 수직거리  $Y$ 에 대한 좌측면 무차원 온도를 나타내고 있다. 밑면에서 가열된 유체의 영향을 직접받아 고온인 좌측면의 온도분포는 방사율 증가에 따라 저온부로의 복사에너지의 출사량이 상

승하여 현저히 감소하고 있다.

Fig. 7은 조건이 Fig. 6과 동일한 경우 우측 단열면 온도분포를 나타내고 있다. 우측면 온도분포는 방사율이 증가됨에 따라 Fig. 6과 반대로 증가하고 있다. 이는 우측단열면이 유동방향과 우측저온부에 의한 영향으로 저온으로 형성되므로 방사율이 증가함에 따라 좌측 단열면에 의한 복사에너지의 조사량이 증가되기 때문이다.

Fig. 8은  $Ra=1.25 \times 10^5$ 일때 방사율에 대한 평균 밑면, 윗면, 우측면 Nusselt수를 나타내고 있다. 밑면, 윗면, 우측면의 평균 Nusselt수는 방사율이 증가함에 따라 현저히 증가하고 저온면과 고온면의

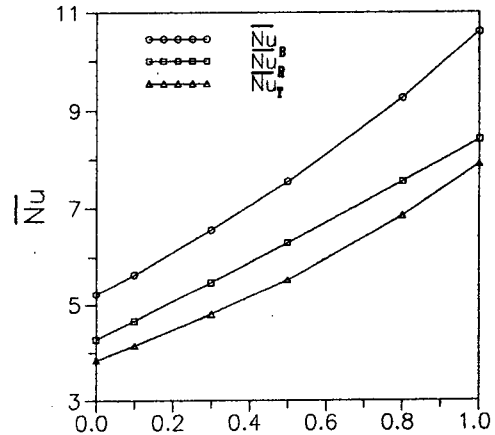


Fig. 8 Mean Nusselt number versus emissivity at  $Pr=0.69, Ra=1.25 \times 10^5$

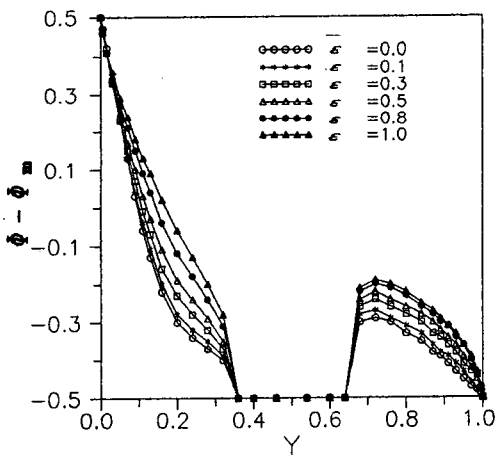


Fig. 7 Local temperature of the right surface versus dimensionless vertical distance for various emissivities at  $Pr=0.69, Ra=1.25 \times 10^5$

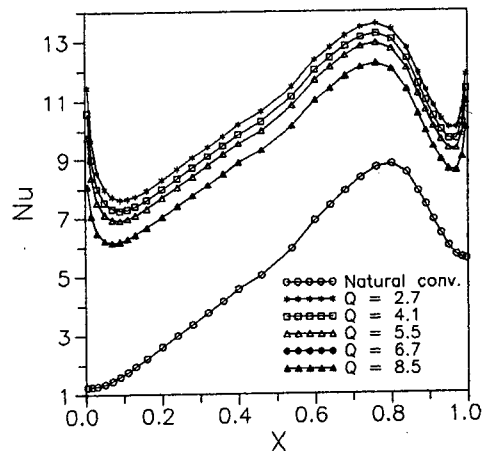


Fig. 9 Local Nusselt number at the bottom surface versus dimensionless horizontal distance for various dimensionless insulation energies at  $Pr=0.69, Ra=1.25 \times 10^5$

조사량과 출사량의 증가로 인하여 최대 2배 정도까지 증가하였다.

Fig. 9는  $Ra=1.25 \times 10^5$ , 일사복사일때 여러가지  $Q$ 에 관하여 무차원 수평거리에 대한 국소 밀면 Nusselt수  $Nu_B$ 를 나타내고 있다.

일사복사와 자연대류의 경우 모두 Fig. 3과 동일한 영향에 의하여 우측부근( $X \approx 0.72$ )에서  $Nu_B$ 가 최대값을 나타내고 있다. 일사복사 경우가 우측면 부근에서 조사량 증가로 인한 2차유동이 활발하게 형성되기 때문에 자연대류 경우보다 최대값이 미소하게 좌측으로 이동하고 있다.  $Q$ 가 증가함에 따라 밀면으로 조사량이 증가하여 정미복사량을 감소시키기 때문에 밀면에서의 복사 열전달이 감소함을 나타내고 있다.

Fig. 10은 조건은 Fig. 9와 동일한 경우 국소 윗면 Nusselt수  $Nu_T$ 를 나타내고 있다. 일사복사와 자연대류의 경우 모두 Fig. 4와 동일한 영향에 의하여  $Nu_T$ 이 좌측 부근에서 최대값을 나타내고  $Q$ 가 증가함에 따라 좌측면과 윗면으로 조사량이 증가하여 그 값이 미소하게 좌측으로 이동하였다.  $Q$ 가 증가함에 따라 윗면으로의 조사량 증가로 인한 정미복사량의 증가와 각지점에서의 온도가 증가하여 Fig. 9와 반대로 대류열전달이 증가하고 있다. 우측면에서 투과현상이 발생하므로 우측 단열면 부근에서  $Q$ 의 증가에 따른 복사효과는 미소하게 나타나고 있다.

Fig. 11은 조건이 Fig 9와 동일한 경우 국소 우측면 Nusselt수  $Nu_R$ 을 나타내고 있다.  $Q$ 가 5.5, 6.7인 경우와 2.7, 4.1인 경우는 자연대류보다 열전달이 각각 현저히 감소와 증가하며  $Q$ 가 8.5인 경우는 출사량 증가에 의한 가열현상을 나타내고 있다. 이는  $Q$ 가 증가함에 따라 우측면 저온부에서 조사량에 의한 외부로의 냉각보다는 출사량에 의한 가열이 증가하여 대류에 의한 열손실이 감소하기 때문이다.

Fig. 12는  $Ra=1.25 \times 10^5$ , 일사복사일때 여러가지  $Q$ 에 관하여 무차원 수직거리  $Y$ 에 대한 좌측면 무차원 온도를 나타내고 있다.

좌측면 온도분포는  $Q$ 가 증가함에 따라 각 위치에서 벽면의 온도가 증가하며 특히  $Q$ 가 4.1이상인 경우는 윗면 저온부 부근에서는 자연대류보다 높은 온도분포를 나타내고 있다. 이는  $Q$ 에 의한 복사에너지의 조사량이 증가하여 상대적으로 저온인 윗면 부근의 좌측면에 큰영향을 미치고 있음을 나타내는

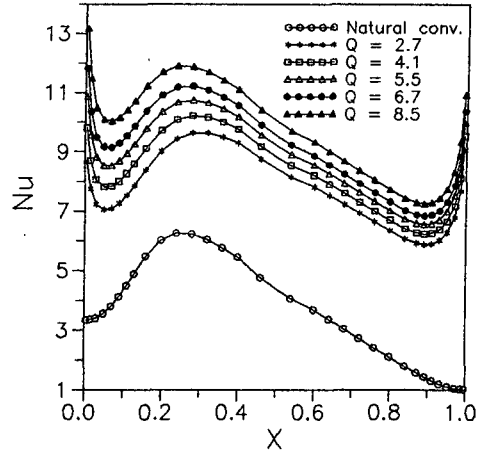


Fig. 10 Local Nusselt number at the top surface versus dimensionless horizontal distance for various dimensionless insolation energies at  $Pr = 0.69$ ,  $Ra = 1.25 \times 10^5$

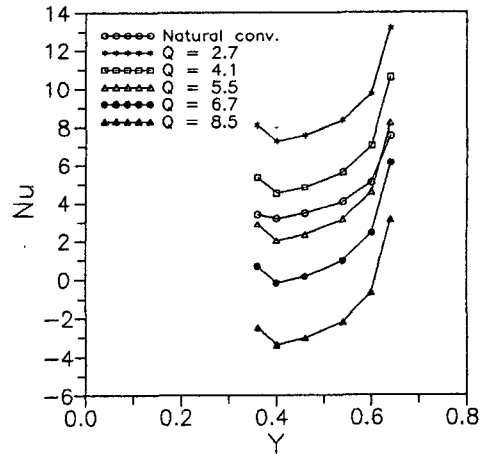


Fig. 11 Local Nusselt number at the right surface versus dimensionless vertical distance for various dimensionless insolation energies at  $Pr = 0.69$ ,  $Ra = 1.25 \times 10^5$

것이다.

Fig. 13은 조건이 Fig. 12와 동일한 경우 우측 단열면 온도분포를 나타내고 있다. 우측면의 온도분포는 유동방향과 우측 저온부에 의한 영향으로 좌측 단열면보다 상대적으로 저온이므로  $Q$ 에 의한 복사에너지의 이 조사량이 증가하여 자연대류의 경우보다 현저히 증가하고 있다. 그러나 우측면에서 투과현상이 발생하므로  $Q$ 의 직접적인 영향을 받지 못하기 때문에  $Q$ 의 증가에 따른 온도분포는 거의 유사하게 나타난다.

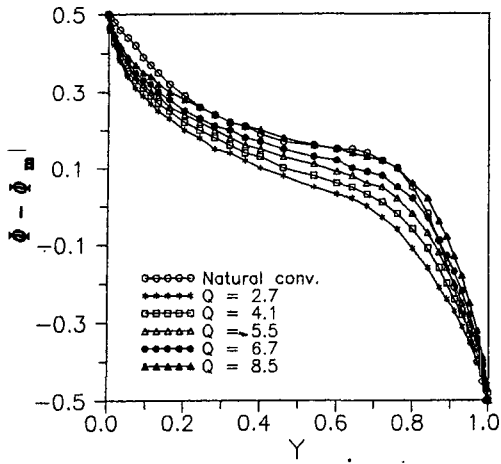


Fig. 12 Local temperature at the left surface versus dimensionless vertical distance for various dimensionless insolation energies at  $Pr=0.69$ ,  $Ra=1.25 \times 10^5$

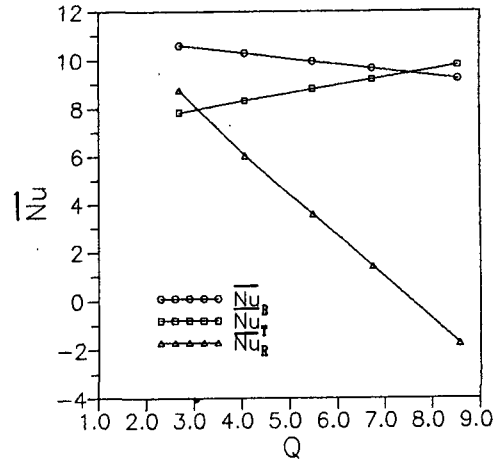


Fig. 14 Mean Nusselt number versus dimensionless insolation energies at  $Pr=0.69$ ,  $Ra=1.25 \times 10^5$

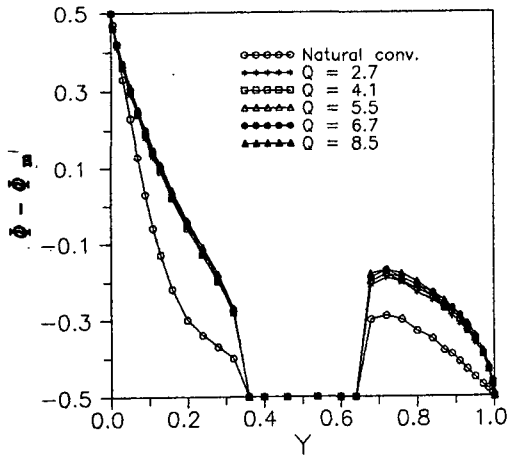


Fig. 13 Local temperature at the right surface versus dimensionless vertical distance for various dimensionless insolation energies at  $Pr=0.69$ ,  $Ra=1.25 \times 10^5$

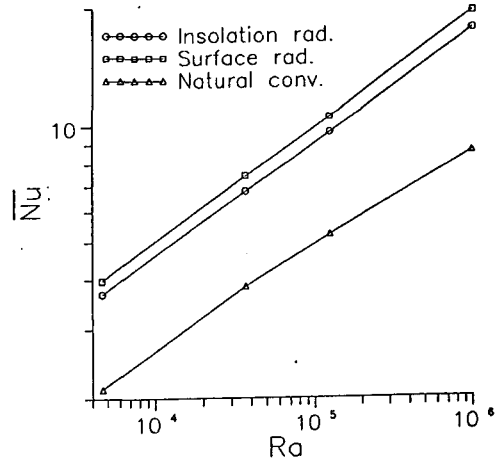


Fig. 15 Mean bottom nusselt number versus Rayleigh number at  $Q=6.7$ ,  $\epsilon=1.0$ ,  $Pr=0.69$

Fig. 14는 조건이 Fig. 9와 동일한 경우 평균 밀면, 윗면, 우측면 Nusselt 수를 나타내고 있다. 평균 밀면, 우측면 Nusselt수는  $Q$ 가 증가함에 따라 감소하고 그 값은 최대 12.9%, 115.5%씩 감소하고 있다. 이는  $Q$ 가 증가 하여 밀면에서 조사량과 우측면에서 출사량이 현저히 증가되어 온돌공간의 내부 온도를 증가와 우측저온부로의 열손실이 감소되기 때문이며 이 영향으로 평균 윗면 Nusselt수가  $Q$ 가 증가함에 따라 증가하고 최대 19.2% 증가 하

고 있다.

Fig. 15는  $Q$ 가 6.7이고  $4.63 \times 10^3 \leq Ra \leq 1 \times 10^6$ 에서 자연대류와 표면(일사) 복사인 경우 특성길이 ( $L$ )를 변수로한 Rayleigh수에 대한 밀면 평균 Nusselt수를 나타내고 있다. 복사전달이 고려되지 않은 자연대류와 표면(일사) 복사에 의한 Nusselt 수는 다음과 같은 상관식으로 나타 내어진다.

$$\text{자연대류} : \overline{Nu}_B = 0.236 (Ra)^{0.260}$$



$$\text{일사복사: } \overline{Nu_B} = 0.315(Ra)^{0.291}$$

$$\text{표면복사: } \overline{Nu_B} = 0.328(Ra)^{0.296}$$

여기서 자연대류와 표면(일사)복사의 열전달값 차이는 복사 열전달량으로 나타낼 수 있으며 일사복사의 경우가 표면복사의 경우보다 열전달이 둔화되는 것은 Fig. 9에서 고찰한바와 같이  $Q$ 에 의한 밀면으로의 조사량이 증가하여 정미복사량이 감소하기 때문이다.

#### 4. 결 론

정사각형 온돌공간내부의 복사 열전달에 관하여  $4.6 \times 10^3 \leq Ra \leq 1 \times 10^6$ ,  $Pr = 0.69$ 일때 낮과 밤을 가정하여 각각 무차원 일사 에너지( $Q$ )를 2.7-8.5, 방사율( $\epsilon$ )을 0.0~1.0으로 변경하여 수치해석한 결과는 다음과 같다.

(1)  $Ra = 1.25 \times 10^5$ 일때 좌측 단열면과 우측 단열면의 온도분포는 방사율이 증가하면 감소와 증가되고 무차원 일사 복사열유속이 증가되면 증가와 유사하게 나타났다.

(2)  $Ra = 1.25 \times 10^5$ 일때 방사율이  $\epsilon = 0$ 에서 증가하면 밀면, 윗면, 우측면의 평균 Nusselt수는 자연대류에 비해 최대 2배 정도까지 증가한다.

(3)  $Ra = 1.25 \times 10^5$ 일때 무차원 일사 복사열유속이 증가함에 따라 밀면과 우측면의 평균 Nusselt수는 최대 12.9%와 115.5% 감소하고 윗면 평균 Nusselt수는 19.2% 증가한다.

(4)  $Q$ 가 6.7이고  $4.63 \times 10^3 \leq Ra \leq 1 \times 10^6$ 에서 자연대류와 표면(일사)복사의 경우 평균 밀면 Nusselt는  $Ra$ 의 지수함수로 나타낼 수 있다.

#### 참고문헌

- (1) De vahl Davis, G., 1968, "Laminar Natural Convection in an Enclosed Rectangular Cavity," Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 11, pp. 1675~1693.
- (2) Wilkes, J.O. and Churchill, S.W., 1966, "The Finite-Difference Computation of Natural Convection in a Rectangular Enclosure," A.I. Ch.E. Journal, Vol. 12, No.1, pp.161~166.
- (3) Meyer, B.A., Mitchell, J.W. and El-Wakil, M. M., 1982, "The Effect of Thermal Wall Properties on Natural Convection in Inclined Rectangular Cells," ASME J. of Heat Transfer, Vol.104, pp. 111~117.
- (4) 박명식, 이재현, 1991, "다수의 분리판이 존재하는 정사각형 밀폐공간 내에서의 표면복사-자연대류 열전달 특성에 관한 연구", 공기조화 냉동 공학회 창립 20주년 논문집, pp. 153~159.
- (5) 김용진, 1991, "창문에서의 열전달 해석 및 온도의 방열량 산정", Energy R & D, Vol.13, No. 3, pp.126~137.
- (6) Hottel, H.C., 1954, Radiant-heat Hransmission, in William H, McAdams(ed), "Heat Transmission," 3rd ed., chap.4, McGraw-Hill Book Company, New York.
- (7) Siegel, R. and Howell, J.R., 1981, Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw-Hill, 2nd edition.