2次元 온돌 床煖房시스템의 연도내 熱流動 및 熱傳達 數値解析

Numerical Analysis of Heat Flow and Heat Transfer in Flue Channel of Two-Dimensional Ondol Panel Heating System

김 영 득*, 민 만 기**, 이 상 혁***, 김 원 갑***
Y. D. Kim, M. K. Min, S. H. Lee, W. K. Kim

Key words : Ondol(온돌), Radiant Floor Panel Heating(복사바닥난방), Flue Channel(煙道), Boussinesq Approximation(부시네스크 근사), Buoyancy Effect(부력효과)

Abstract

Numerical analysis was applied to a simplified two-dimensional Ondol heating model which consists of heating space on the top of it along with radiant and convective heating floor panel, flue channel in the midway and rectangular underground soil region at the bottom. These three components constitute a system thermally coupled at the top and bottom interfaces of the flue channel.

Investigated in the present paper are effects with variations of the Reynolds numbers of 100, 200, and 300, Grashof numbers of 0.1×10^6 and 0.3×10^6 and aspect ratios of 15 and 20 on the heat transfer and fluid flow characteristics of two-dimensional Ondol heating model by computer simulation.

기 호 설 명

A_B, A_W : 바닥과 좌·우 벽면 및 천정의 면적[m^2]
A_r : 아르키메데스수
d : 유도관 직경[m]
F_{bb}, E_{bw} : 바닥과 벽 및 천정의 방사력[w/m^2]
F_{p-w} : p표면에서 방출되는 에너지중 w표면에 도달되는 에너지의 비율, 형상계수
H : 煙道 높이[m]
H_0 : 땅속 깊이[m]
H_1 : 居室의 바닥[구들장] 두께[m]
H_2 : 居室 높이[m]
L : 煙道 또는 居室의 길이[m]
P : 무차원 압력, $[pu_{in}^2]/\rho$
P_r : 프란틀수
q_{p-w} : 바닥에서 좌·우 벽면 및 천정으로의 복사열량[w]
R_e : 레이놀즈수
T : 무차원 온도(고래 및 난방공간), $(t-t_R)/(t_{in}-t_R)$
T : 무차원 온도(땅속), $(t_{GS}-t_{GU})/(t_{GD}-t_{GU})$
t_{in} : 연소가스의 온도[℃]
t_{GD} : 땅속 온도[℃]
t_{GS} : 땅속의 좌·우 벽면 온도[℃]
t_{GU} : 땅표면온도[℃]
t_0 : 외기온도[℃]
t_r : 실내온도[℃]
y_c : 고래내의 밑면에서 고래의 중심선까지의 높이[m]

* 정회원, 인덕전문대학 기계과
** 정회원, 고려대학교 기계공학과
*** 정회원, 고려대학교 기계공학과 대학원

U, V : x, y방향의 무차원 속도
X, Y : x, y좌표의 무차원
Y_c : y_c의 무차원
$\varepsilon_p, \varepsilon_w$: 바닥, 좌 · 우 벽면 및 천정의 방사율 [0.93]
σ : Stefan-Boltzmann상수, 5.729×10^{-8} W/m^2K^4

1. 서 론

1960년대 말까지 우리나라의 거의 모든 주택에서는 古代 로마의 "hypocaust"라는 난방방식과 비슷한 재래식 복사온돌 床煖房이 사용되어 왔다. 이 복사난방시스템의 가장 큰 利點은 居室 內의 수직방향의 온도가 거의 일정하기 때문에 쾌적성이 두드러지게 좋다는 점과 난방장치가 모두 床패널 밑으로 감추어지고 있기 때문에 居室의 공간을 잘 활용할 수 있다는 점을 들 수 있다.

온돌난방시스템은 기본적으로 연소기인 아궁이, 연소가스 流路인 고래 그리고 굴뚝 등의 3개 요소로 이루어진다. 아궁이에서 발생한 연소가스는 고래를 통해 흐르는 가운데 바닥을 데워 거실을 따뜻하게 만들고 방열을 하면서 저온이 되는 연소가스는 굴뚝을 통해 대기 중으로 배출된다.

이들 각 요소 내에서의 연소가스 흐름의 성능특성은 성능에 영향을 미치는 많은 인자들 서로가 관련이 있고, 따라서 이 재래식 온돌 난방장치에 관한 성능 특성은 시스템의 관점에서 해석되어야 하고 아울러 이 난방 시스템에 관한 컴퓨터 수치해석은 실험 연구 대신에 필수적일 수 밖에 없다.

본 연구의 계산영역은, 연료의 연소기인 아궁이, 연소가스 유입관인 유도관, 그리고 연소가스 배출구인 굴뚝은 각각 제외되고 오직 온돌난방시스템의 중간부분으로 중심요소인 煙道, 그리고 煙道의 윗면과 아랫면에 열적으로 연결되어 있는 2개의 受熱部 즉, 煙道의 윗면에 있는 구들장이라는 床바닥과 이 床바닥을 덮고 있는 난방공간의 居室 그리고 煙道 아래쪽으로 일정 깊이의 땅속이다(Fig.1 참조). 그리고 땅속 깊이는 5m로 잡았다. 이 온돌난방모델에 대한 2차원 열유동 및 열전달의 성능특성을 수치적으로 해석하였다.

고래내를 통해 흐르는 유체는 공기로 가정하고 온도에 의한 밀도 변화는 부시네스크 근사(Boussinesq approximation)를 가정하여 운동량 방정식에 적용해서 부력효과를 고려하였다. 煙道를 통하여 열유동을 지배하는 여러가지 독립변수로서 레이놀즈수 100, 200 및 300[1], 0.1×10^6 및 0.3×10^6의 그라스호프수 그리고 0.707의 프란틀수를 취하고 煙道 높이에 대한 煙道 길이의 比인 종횡비로서 15 및 20의 2가지 값을 선택하였다.

2. 지배방정식과 수치해석방법

Fig.1은 온돌상난방모델의 전 계산영역을 나타낸다. 全 영역은 3개의 작은 영역, 즉 거실, 煙道 및 일정 깊이의 땅속으로 구성된다. 이 全 계산영역은 流路內를 흐르는 가스유동방향에 대해 수직 단면으로 자른 단면도를 나타내고 있다. Fig.2는 고래내에서의 격자생성을 나타내는데 격자는 엇갈림 격자(staggered grid)를 사용하였고, 격자생성은 연도의 위 · 아래면 근방에서는 조밀하게 가운데 부

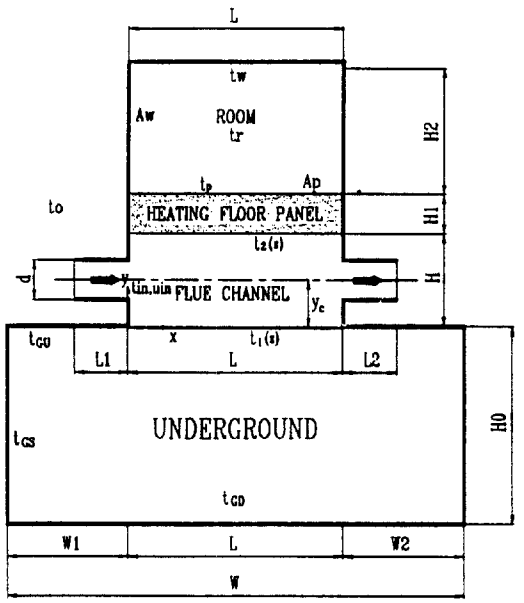


Fig.1 Calculation domain of the Ondol panel heating model

Fig.2 Grid generation

분은 성기게 하였으며 그리고 급격축소부에서 유도관출구까지는 점차 성기게 하였다.

2.1 煙道 및 居室에서의 熱流動

지배방정식

연도 및 거실내의 비압축성, 점성유체의 2차원 열유동에 대한 무차원 지배방정식은 연속방정식, 부시네스크 근사의 운동량 방정식, 그리고 에너지 방정식이다. 이들은 모두 일정한 물성치를 갖는 정상상태 층류흐름에 대한 방정식이다.

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \tag{1}$$

$$U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial X}+\frac{1}{R_e}\nabla^2 U \tag{2}$$

$$U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial Y}+\frac{1}{R_e}\nabla^2 V+A_r T \tag{3}$$

$$U\frac{\partial T}{\partial X}+V\frac{\partial T}{\partial Y}=\frac{1}{R_e P_r}\nabla^2 T \tag{4}$$

여기서,

A_r : 아르키메데스수
P : 무차원 압력, $(pu_{in}^2)/\rho$
P_r : 프란틀수
R_e : 레이놀즈수
T : 무차원 온도, $(t-t_R)/(t_{in}-t_R)$
U, V : x, y 방향의 무차원 속도
X, Y : x, y 좌표의 무차원

이다.

가정

연도입구 즉 誘導管 출구에서의 유동은 완전히 발달된 속도분포를 가지며, 각 재질 및 유체의 물성치는 일정하다. 또한 점성소산에 의한 온도변화와 압축은 무시한다.

경계 조건

거실에서 벽면, 천정면 및 실내 공기의 온도는 일정하다. 연도내에서 벽의 상하경계면에서의 속도는 0 이다. 煙道내의 윗면과 아랫면에서의 온도분포의 초기값은 시행값으로서 $T_1(X)$와 $T_2(X)$[2]를 사용한다. 煙道의 입구 및 출구측의 수직벽면은 네곳 모두 단열된 것으로 간주한다. 煙道의 입구측에서의 연소가스의 속도는 완전히 발달된 포물선 분포로서 $U=1.5(1-(Y-Y_c))^3$[3]를 사용하고 온도는 일정한 것으로 한다.

거실의 바닥에서 좌·우 벽면 및 천정면으로의 복사 열량은 다음과 같이 주어진다.[4]

$$q_{P-W}=\frac{E_{bP}-E_{bW}}{\frac{1-\varepsilon_P}{\varepsilon_P A_P}+\frac{1}{A_P F_{P-W}}+\frac{1-\varepsilon_W}{\varepsilon_W A_W}} \tag{5}$$

여기서,

A_p, A_w : 바닥과 좌·우 벽면 및 천정의 면적 [m^2]
E_{bp}, E_{bw} : 바닥과 벽 및 천정의 방사력[w/m^2]
F_{p-w} : p표면에서 방출되는 에너지중 w표면에 도달되는 에너지의 비율, 형상계수
q_{p-w} : 바닥에서 좌·우 벽면 및 천정으로의 복사열량[w]
ε_p, ε_w : 바닥, 좌·우 벽면 및 천정의 방사율 [0.93]

이다.

또한, 바닥에서 실내 공간으로의 자연대류에 의한 열전달 및 바닥을 통한 열전도는 각기 다음과 같이 표시된다.[5]

$$q_{nc}=2.18A_p(t_p-t_R)^{1.31} \tag{6}$$

$$qc=k_P A_P\frac{\Delta t}{\Delta y} \tag{7}$$

여기서,

k_p : 바닥의 열전도율[w/(m℃)]
q_{nc} : 자연대류에 의한 열전달[w]
q_c : 열전도에 의한 열전달[w]
t_p : 바닥표면온도[℃]
t_R : 실내난방공간온도[℃]
Δt : 미소온도변위[℃]
Δy : 미소두께변위[m]

이다.

그리고 煙道 내 임의의 수직 단면에서의 평균온도인 혼합평균온도(bulk temperature), t_b와 벽면에서의 국부대류열전달계수, h[6]는 다음 식으로 표

시된다.

$$t_b=\frac{\int_0^H \rho C_p\, utdy}{\int_0^H \rho C_p C_p udy} \tag{8}$$

$$h=\frac{k\frac{\partial t}{\partial y}\Big|_{y=dy}}{t_b-t_w} \tag{9}$$

여기서,

C_p : 정압비열[w/℃]
h : 대류열전달계수[w/(m² ℃)]
t_b : 혼합평균온도[℃]
t_w : 유체온도[℃]
u : 유속[m/s]
ρ : 밀도[kg/m³]

이다.

2.2 땅 속

지배 방정식

땅속에서의 2차원, 무차원 지배 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}=0 \tag{10}$$

여기서 무차원 온도, T는 $T=(t_{GS}-t_{GV})/(t_{GD}-t_{GV})$로, 그리고 좌표, X 및 Y는 유도관직경, d로 무차원화 하였다.

가정

땅속은 반무한체이고 땅 표면은 편평하다. 흙의 열적물성치는 일정하고, 땅속의 양쪽 수직벽면의 온도분포는 땅표면에서 일정 땅속깊이까지 선형적으로 변하는 것으로 가정하여 무차원식 $T=-(Y/H_0$로 한다.

2.3 수치 해석 방법

수치계산은 2차원 온돌床난방시스템에 대하여 수행하였다. 본 연구에서 사용한 지배방정식은 유한차분법으로 해석하였고, Tech Code[7]를 수정해서 적용하였다. 계산영역에서는 Fig.2와 같이 성긴 격자와 조밀한 격자를 함께 사용하였다. 각 계산영역에 사용한 격자수는 거실에서 83×20, 煙道내에서 83×21, 땅속에서 123×20이다. 해의 수렴과 안정성을 증진시키기 위하여 Block Correction[8]을 적용시켰다.

3. 결과 및 고찰

2차원의 온돌난방모델에 대한 열전달 및 열유동 특성에 관한 계산을 레이놀즈수, 100, 200 및 300, 그라스호프수, 0.1×10^6 및 0.3×10^6 그리고 종횡비, 15 및 20 등으로 변화시키면서 수행하였다.

Fig.3은 煙道내 유동에 따른 4가지의 온도 분포 즉, 그림의 위에서 아래의 순서로, (1) 열유체의 혼합평균온도, (2) 煙道내의 윗면의 온도, (3) 바닥표면온도, (4) 煙道내의 아랫면의 온도들을 나타내고 있다. 煙道내의 유체의 혼합평균온도는 연소가스가 煙道의 입구에서 출구로 흐르는 가운데 煙道의 윗면과 아랫면으로 빼앗기는 熱로 인하여 점차 내려가고, 레이놀즈수가 클수록 온도감소율은 더욱 작아진다. 연소가스가 煙道의 출구에 가까워질수록 감소율은 줄어든다. 레이놀즈수가 더 커지는 유동의 경우에 혼합평균온도의 분포곡선이 더 높아지는 것은 유입되는 연소가스의 열용량이 더 커지기 때문이다. 복사바닥난방에서 연도의 입구

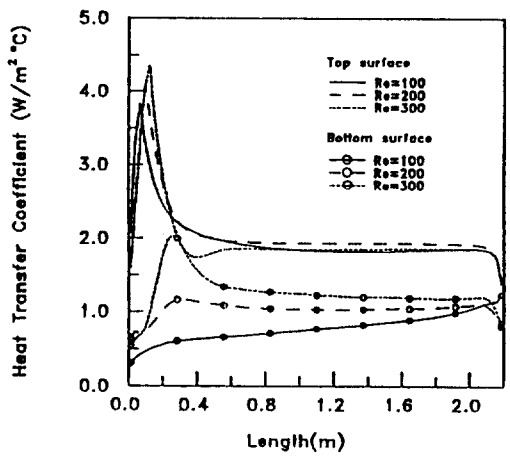


Fig.3 Temperature Distributions of (1) the bulk of hot fluid, (2) the floor panel surface, (3) the top and (4) the bottom surface of the flue channel for Reynolds numbers of the 100, 200 and 300(AR=20 and Gr=0.1×10^6).

근처에 갑작스런, 뾰쪽한 온도 상승점이 나타나는 것은 특징적이다. 뒤이어 연도의 나머지 뒷부분에서 감소하는 온도의 감소율이 점차 회복하는 특성을 혼합평균온도에서 볼 수 있다. 煙道의 윗면과 바닥 표면 사이의 온도차는 연도의 출구쪽으로 갈수록 줄어들고 있다. 반면에 煙道의 아랫면인 바닥 전체에 걸쳐서는 표면온도의 변화가 거의 없다.

Fig.4는 레이놀즈수, 100, 200 및 300인 경우에 대하여 煙道의 윗면과 아랫면을 따른 국부대류열전달계수의 분포를 나타내고 있다. 煙道의 급격한 확대입구 직후의 윗면의 열전달계수는 날카로운 창처럼 뾰쪽하게 증가하다가 즉시 감소하는 모양의 특징을 갖는다. 온돌난방에서 이와 같은 모양은 거실의 앞쪽 바닥에서 국부적으로 매우 뜨거운 지점을 만든다.

동시에 Fig.5의 (a)와 (b)는 또한 이와 같은 현상을 이해하는데 도움을 주고 있다. Fig.5의 (a)의 속도벡터와 Fig.5의 (b)의 등온선에서 煙道의 맨 앞부분의 윗면과 아랫면 근처를 자세히 살펴보면, 왼쪽 모서리의 윗부분에서 재순환유동이 생기고 아울러 갑작스런 속도벡터의 변화가 일어난다. 반면에 위 재순환유동의 뒤에서 煙道의 윗면, 왼쪽 모서리에 생긴 것보다 훨씬 더 큰 또 다른 재순환유동이 아랫면에 생기고 동시에 국부적으로 속도벡터가 급격히 변한다. 이러한 국부적 열유동때문에 국부열전달계수의 급격한 상승과 하강은 煙道의 입구 근처의 윗면과 아랫면 모두에 일어난다. 레이놀즈수가 클수록 급격한 상승은 더 올라간다.

Fig.6의 (a)는 레이놀즈수, 100, 200 및 300인 경우에 거실의 바닥을 통해 거실로, 그리고 煙道의 아랫면을 통해서 땅속으로 전달되는 熱流束의 분포를 나타내고 있다. 煙道의 입구근처에서 열유속이 갑자기 올라가다 내려오는 특성은 위에서 언급했던 열전달계수와 똑같이 일어난다. 레이놀즈수가 증가할 때 열류의 분포곡선은 煙道의 윗면과 아랫면의 두 곡선에서도 모두 올라간다. Fig.6의 (b)는 그라스호프수, 0.1×10^6 및 0.3×10^6와 추가된 종횡비, 15를 제외하고는 Fig.6의 (a)와 같은 열류분포를 나

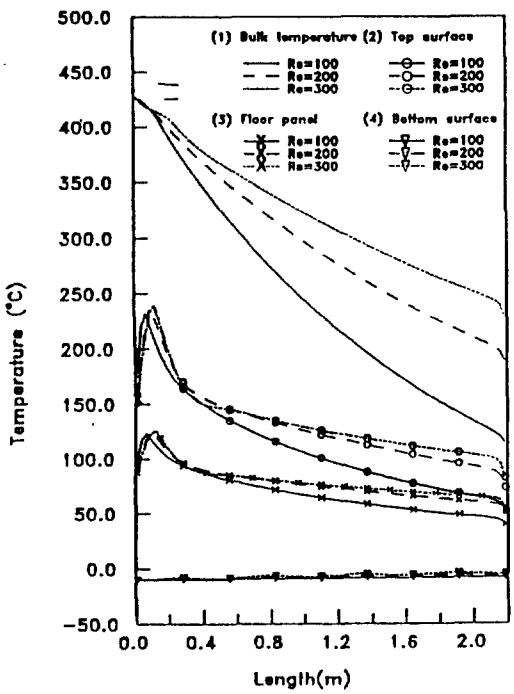


Fig.4 Distributions of local convective heat transfer coefficients along the top and bottom surfaces of the flue channel for Reynolds numbers of 100, 200, and 300(AR=20 and $Gr=0.1\times10^6$).

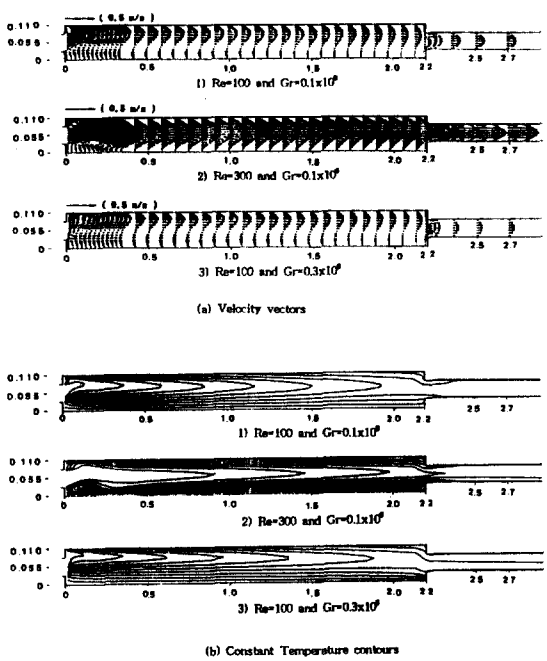
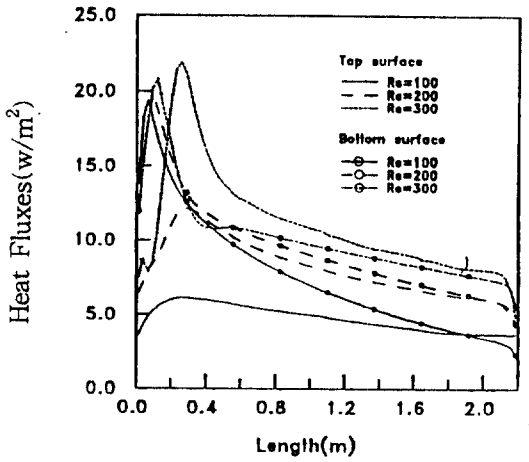
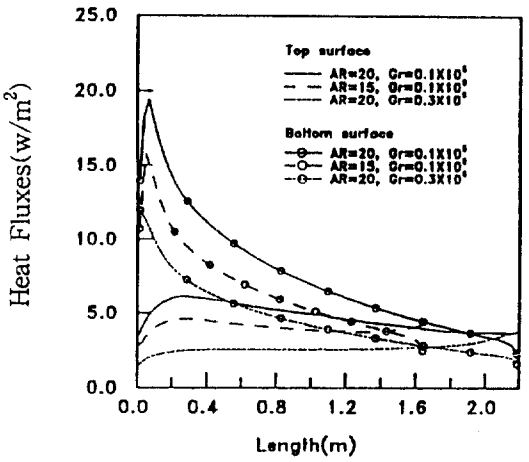


Fig.5 Variations of (a) velocity vectors and (b) constant temperature contours along the flow direction in the flue channel.

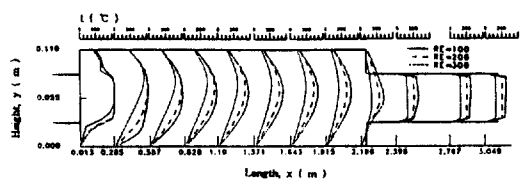


(a) AR=20 and Gr=0.1×10⁶

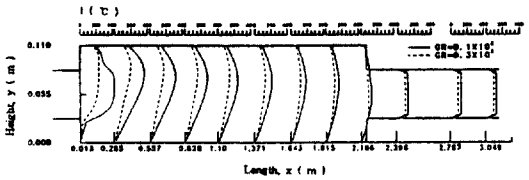


(b) AR=20 and Re=100

Fig.6 Distributions of local heat fluxes along the top and bottom surfaces of the flue channel for (a) Reynolds numbers of 100, 200 and 300, (b) Grashof numbers of 0.1×10^6 and 0.3×10^6 and aspect ratios of 15 and 20.

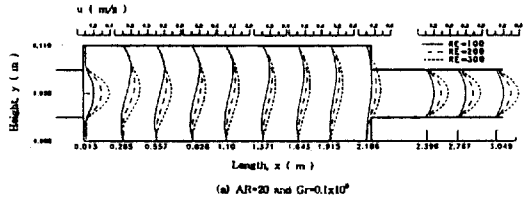


(a) AR=20 and Gr=0.1×10⁶

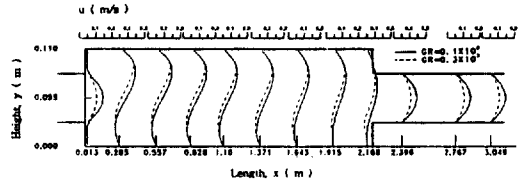


(b) AR=20 and Re=100

Fig.7 Temperature profiles at the consecutive cross-sections in the flue channel with variations of (a) Reynolds numbers of 100, 200 and 300 and (b) Grashof numbers of 0.1×10^6 and 0.3×10^6.



(a) AR=20 and Gr=0.1×10⁶



(b) AR=20 and Re=100

Fig.8 Profiles of horizontal velocities, 'u' at the consecutive cross-sections in the flue channel with variations of (a) Reynolds numbers of 100, 200 and 300 and (b) Grashof numbers of 0.1×10^6 and 0.3×10^6.

타낸다. 그러나 이 경우에 그라스호프수가 증가할 때 열유속의 분포곡선은 내려간다.

Fig.7은 煙道내에서 계속되는 일련의 12개의 수직단면에서의 온도분포를 보이고 있다. 레이놀즈수가 클수록 온도분포는 더 높아진다. 이것은 레이놀즈수가 증가함에 따라 연소가스의 혼합평균온도의 분포가 더 높아지는 것과 똑같은 경향을 나타내고 있다.

Fig.8의 (a)와 (b)는 煙道내 각 단면에서 레이놀즈수와 그라스호프수의 변화에 따른 수평속도, u의 분포변화를 나타내고 있다. Reynolds-Colburn analogy, $Nu_x=C_x/2R_e P_r^{1/3}$가 이 煙道내 층류유동에 적용된다.

Fig.8의 (a)의 煙道내의 윗면 상에서 x=0.3 및

x=1.36인 지점에서의 3개의 u 속도기울기를 조사해 보면, 속도기울기의 상대적 크기가 서로 반대이다. 즉, x=0.3인 지점에서 레이놀즈수 100에서의 속도기울기는 레이놀즈수 200에서의 그것보다 더 크다. 그러나 x=1.36인 곳에서는 레이놀즈수 100에서의 속도기울기가 레이놀즈수 300인 경우보다 더 작다. 반면에 위 analogy는 Fig.4와는 조금도 다름이 없음을 확인하게 된다. 煙道내의 윗면의 x=0.3이 되는 곳에서 레이놀즈수 100과 300에 대한 열전달계수의 크기를 비교해 보면, 레이놀즈수 100의 경우의 열전달계수는 레이놀즈수 300의 경우 보다 더 크나 x=1.36의 지점에서는 반대임을 알수 있다. Fig.8의 (b)에서는 그라스호프수의 변화가 또한 煙道내의 아랫면에서의 속도기울기에 영향을 준다. x=1.1에서의 그라스호프수, 0.1×10^6 및 0.3×10^6에 대한 2개의 속도기울기는 Fig.8의 (b) 상의 x=1.1 및 x=1.915에서의 열전달계수의 상대적 크기와 반대가 되고 있다.

4. 결 론

2차원 온돌난방모델, 즉 열을 발생하는 아궁이 및 연소가스의 배기를 위한 굴뚝을 제외한 난방공간인 床바닥을 포함하는 거실, 煙道 및 땅속 일정깊이로 구성되는 床난방시스템에 대하여, 열유동과 열전달의 특성이 레이놀즈수, 100, 200 및 300, 그라스호프수, 0.1×10^6 및 0.3×10^6 그리고 종횡비, 15 및 20인 경우에 대하여 수치적으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 煙道내의 연소가스의 혼합평균온도는 煙道의 입구에서 출구쪽으로 煙道를 따라 점차 감소하고, 레이놀즈수가 클수록 온도감소율은 약 37.5% 더욱 작아진다. 또한 연소가스가 출구에 가까워질수록 그 온도감소율은 줄어든다.

2) 복사床난방에서 煙道내의 입구 가까운 곳에 급격한 온도 상승점이 위치하는 뚜렷한 특징이 있다. 煙道내의 윗면과 거실의 바닥면 사이의 온도차는 煙道의 출구쪽으로 갈수록 줄어 들고, 이는 레이놀즈수가 작을수록 감소율이 약 16.3% 더욱 커진다. 반면에 煙道내의 아랫면바닥 전체에 걸쳐서는 온도 변화가 거의 없다.

3) 煙道내의 급격한 확대입구 직후에서는 윗면의 열전달계수는 날카로운 창처럼 급격히 증가하다가 감소하는 모양의 특징을 보이고, 이 모양은 거실의 바닥 앞부분을 국부적으로 매우 뜨겁게 만든다. 煙道내의 맨 앞부분에서의 국부열전달계수의 갑작스런 상승과 하강은 煙道내의 윗면과 아랫면 각각 입구에서 7~12cm 및 26cm 근처에서 모두 일어난다. 이때 레이놀즈수가 클수록 급상승은 더 높아간다.

4) 煙道내의 입구근처에서 급격히 올라가고 내려오는 열유속의 특성은 열전달계수와 똑같은 특성에 연유하고 있다.

후 기

본 연구는 인덕 전문대학 교내 연구비의 일부 지원으로 수행된 연구 결과로서, 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 이관, 1968, "재래식 난방식 Geometry에 따른 유체역학적 특성 연구", 원자력연구소, E68-15, 과학기술처, p.4.
2. 이창수, 1983, "온돌 연도 내의 2차원 열유동 분포에 관한 수치 해석", 고려대학교 석사학위논문, pp.17-18.
3. 윤영, 1989, 2차원 급격 확대 및 축소 채널에서의 층류 유동과 열전달에 관한 수치 해석", 고려대학교 석사학위논문
4. Stone, J. M., 1963, Radiation and Optics, McGraw Hill Co., New York.
5. Ashrae Handbook, 1984, System, p.8.5
6. Eckert, E. R. G. & Drake, R. M., 1972, Analysis of Heat and Transfer, Graw-Hill Co., New York.
7. Lilley, D. G. & Rhode, D. L., "A Computer Code for Swirling Turbulent Axisymmetric Recirculating Flows in Practical Isothermal Combustor Geometries", NASA Contractor Report 3442.
8. Minkowyca, W. J., Sparrow, E. M., Schneider, G. E. & Pletcher, R. H., 1988, Handbook of Numerical Heat Transfer, A Wiley-Interscience Publication, pp.228-229.