

화재실내 자연대류의 수치해석 Numerical Analysis of Natural Convection in Room Fire

정길순* · 이승만* · 이병곤†

Gil-Soon Jung* · Seung-Man Lee* · Byung-Kon Lee†

충북대학교 안전공학과, *충북대학교 대학원 안전공학과
(2005. 10. 11. 접수/2005. 12. 9. 채택)

요 약

자연대류유동 형태의 실내화재 해석은 Zone 모델과 Field 모델로 대별된다. Zone 모델은 화염과 연소 가스로 인한 상부의 고온 연기층과 하부의 찬 공기층의 온도를 균일하게 간주하고, 실험값을 대입한 간단한 대수식으로 계산하여 간편하나 각각의 위치에 대한 온도와 유속 등을 구할 수 없다. Field 모델은 해석영역을 다수의 격자로 구성하고 운동량, 에너지방정식 등을 수치해석하는 방법으로 많은 계산시간 및 컴퓨터 용량이 필요하나 각각의 위치에서의 유동 및 온도분포 등을 자세히 규명 할 수 있다. 열유동 수치 해석에는 기존의 상용 프로그램들이 있어 강제대류에는 잘 적용되나, 자연대류에는 대부분 만족할 만한 결과를 주지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 실내화재해석의 기초연구로, 바닥면이 부분적으로 가열될 때 우측벽의 경계조건을 변화시켜 가면서 실내의 층류 자연대류로 인한 유동장과 온도장을 SIMPLE 수치해석방법을 이용하여 직접 수치해석하였다.

ABSTRACT

In this study, numerical analysis of two-dimensional unsteady natural convection of air in a square enclosure heated from below, was performed as a basic research of fire science. SIMPLE algorithm was used to the pressure term of momentum equations in the numerical analysis. The numerical analysis were studied for the two model cases and two heat conditions, respectively, which are different with insulation of enclosures and position of heat applied. Also, the ceiling temperatures of enclosure were measured to compare the accuracy of numerical analysis, and it is found that the temperature predicted by numerical analysis were agreed well with the measurements. Streamline and isotherm of the each model case were acquired for each time step.

Keywords : Natural convection, Enclosure, Numerical analysis, Fire

1. 서 론

밀폐된 실내에서 화재현상을 예측하기 위한 해석 방법은 Zone 모델¹⁾과 Field 모델²⁾로 대별된다. Zone 모델은 화염의 열에너지로 주위보다 뜨거워진 연소가스가 부력에 의하여 상승하여 상부에 고온의 연기층을 형성하고 하부의 찬 공기층과 경계를 이루는데, 상부층과 하부층에서의 온도는 일정한 것으로 간주한다.

Zone 모델에서는 상부층과 하부층의 온도, 시간에 따른 연기층의 높이 등을 실험값을 대입한 간단한 대수식으로 계산하여, 계산은 간편하나 각 위치에 대한 온

도와 유속을 구할 수 없다. Field 모델은 해석영역을 다수의 격자로 구성하고 열-유동의 물리적인 현상을 지배하는 운동량, 에너지방정식을 직접 풀어서 수치해석하는 방법으로 많은 계산시간 및 컴퓨터 용량이 필요하나 각 위치에서의 유동 및 온도분포 등을 자세히 규명 할 수 있다. 이러한 열유동 수치해석에는 기존의 상용 프로그램들을 많이 사용하나 자연대류에는 대부분 만족할 만한 결과를 주지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 Field 모델로 화재현상을 해석하는 기초연구로서 바닥면이 부분적으로 가열될 때 우측벽의 경계조건을 변화시켜 가면서 밀폐실내의 층류 자연대류로 인한 유동장과 온도장을 해석하였다.

† E-mail: bklee@cbucc.chungbuk.ac.kr

2. 수치해석

격자는 해석모델이 사각형으로 단순하여 직교형태의 격자를 수작업으로 분할하여 생성하였다. 속도와 압력 분포의 오차를 방지하기 위하여 엇갈림 격자(staggered grid)를 사용하였으며, 벽면, 가열부 등은 격자간격을 작게 배열하였다. 격자의 개수는 한 변을 10, 20, 30, 40개 등으로 변화시켜 수렴할 때까지 계산하여 비교하여 수렴값이 거의 변하지 않는 가로 25×세로 25 정도로 격자를 분할하였다.

프로그램은 비정상상태의 계산이나, 정상상태를 계산하기 위해서는 시간증분의 크기를 매우 크게 하여 수렴해를 얻는다. 수치해석시 적절한 이완계수(relaxation factor)를 도입하였으며, 주로 0.25를 적용하였다. 수렴 조건은 질량생성항의 오차가 10^{-3} 이하이면 수렴하는 것으로 간주하였다. 수렴에 도달하는 반복횟수와 계산 시간은 격자 크기, 계산시간, 수치해석조건 등에 따라 다르나, 대략 500회에서 1000회 이내에서 수렴하였으

며, 계산시간은 PC로 10분 이내였다.

Fig. 1에서, (a)는 바닥의 중앙 부분이 가열되어 고온으로 유지되며 나머지 전체 벽은 단열되는 실의 수치해석 모델과 경계조건이고, (b)는 바닥의 좌측 코너가 가열되어 고온으로 유지되며 나머지 벽은 단열되는 실이다. (c), (d)는 실내에 개구부가 있는 경우의 시뮬레이션을 하기 위하여 (a), (b)의 조건에서 우측벽의 하부 1/2이 상온으로 유지되는 실이다. 그러나 실제 개구부와 같이 공기가 출입하지는 않고, 밀폐된 상태이다.

실제의 실내화재는 대부분 난류유동이고, 복사열전달이 중요하나, 본 연구는 기초 연구로서 유속이 작은 층류유동에 대하여 해석하였으며, 복사열전달은 고려하지 않았다. 2차원 층류 열-유동장에 대한 지배방정식, 초기조건 및 경계조건을 무차원화하기 위하여 속도(U, V), 압력(P), 시간(τ), 좌표(X, Y), 온도(Θ)에 대하여 다음과 같은 무차원 변수를 도입한다. 여기서, α 는 열확산계수, ν 는 동점성계수, β 는 체적팽창계수, Pr은 Prandtl수, Ra는 Rayleigh수이다.

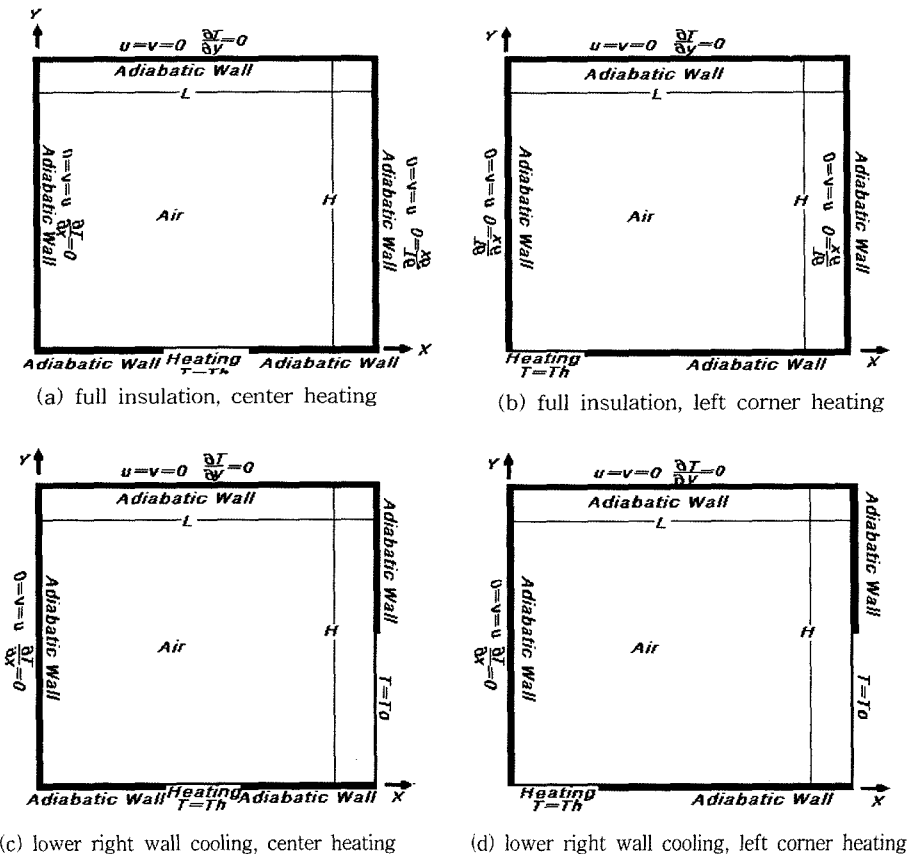


Fig. 1. Simulation model rooms and boundary conditions.

$$U = \frac{u \times H}{\alpha}, \quad V = \frac{v \times H}{\alpha}, \quad P = \frac{p \times H^2}{\rho \times \alpha^2}$$

$$\tau = \frac{\alpha t}{H^2}, \quad X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{H}$$

$$\Theta = \frac{T - T_o}{T_h - T_o}, \quad Ra = \frac{g \times \beta \times \Delta T \times H^3}{\alpha \times \nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

이 무차원변수들을 이용한 무차원 지배방정식은 다음과 같다.

연속 방정식

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

운동량 방정식

x 방향

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

y 방향

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + Pr \nabla^2 V + Ra \Theta \tag{3}$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \nabla^2 \Theta \tag{4}$$

벽에서의 평균 Nusselt 수, 수평중심선에서의 평균 Nusselt 수, 유동함수는 다음과 같다.

$$Nu_{wall} = -\int \left(\frac{\partial \Theta}{\partial y} \right) dx \tag{5}$$

$$Nu_{center} = -\int \left(V \Theta - \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right) dx \tag{6}$$

$$\Psi = \int U dY \tag{7}$$

유체는 공기이며 초기온도는 20°C의 상온이다. Rayleigh수(Ra)는 실험조건과 같게 가열부와 상온의 온도차를 110°C, 높이 H를 0.05 m로 한 0.623×10^6 으로 하여, 비정상상태로부터 정상상태까지 수행하였다. 참고로 Ra수가 10^9 이하는 층류유동이다. 수치해석은 기존의 CFD 상용프로그램을 이용하여 보았으나, 속도가 빠른 강제대류는 잘 예측하나, 속도가 매우 작고 밀도 차이로 인한 부력 유동인 자연대류의 해석은 잘 되지 않아서, SIMPLE방법³⁾으로 자체적으로 프로그래밍하여

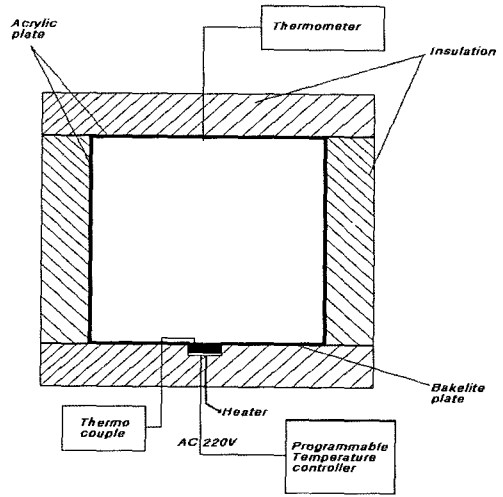


Fig. 2. Schematic diagram of experiment.

해석하였다. 수렴조건은 질량생성항의 오차가 10^{-3} 이하와 속도 등 변수들의 상대오차변화가 10^{-3} 이하이면 수렴하는 것으로 간주하였다.

3. 실험

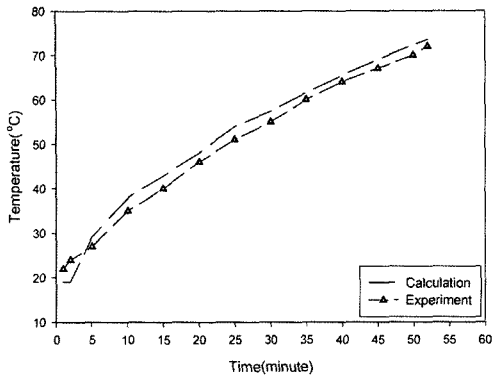
수치해석의 적합성을 검토하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치를 만들어 온도를 측정하였다. 실험장치는 Fig. 2의 H와 L이 각각 5 cm의 정사각형 단면에 길이 15 cm인 육면체를 제작하고, 두께 5 cm의 단열재(polystyrene form)로 단열하고, 가열부에는 폭 1.1 cm, 길이 15 cm의 니크롬선이 들어간 히터(heater)를 부착하였다. 가열면의 온도와 상온과의 온도차는 110°C로 설정하고, 가열면의 온도는 programmable temperature controller를 이용하여 $\pm 2^\circ\text{C}$ 이내에서 자동으로 제어하였다. 길이방향 중앙부의 천정에 thermometer를 설치하고 1분 간격으로 온도를 측정하였다. 그림은 전체단열, 중앙가열의 경우이고, 좌측 코너 가열시는 히터를 좌측코너에 위치시키며, 우측벽 하부 상온의 경우는 우측벽 단열재의 하부 1/2을 제거하여 상온에 노출시키고 실험하였다.

4. 결과 및 고찰

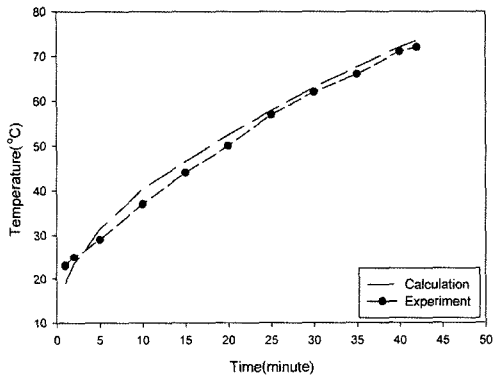
4.1 온도에 대한 수치해석과 실험 결과의 비교

Fig. 3은 실험에서 측정된 천정 중심부의 온도를 수치해석과 비교한 것이다.

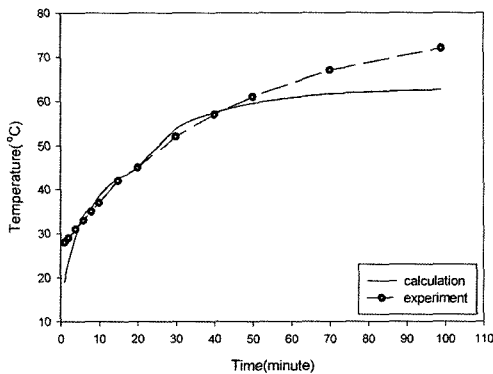
(a)는 전체단열, 중앙가열실로서, 수치해석값이 실험



(a) full insulation, center heating



(b) full insulation, left corner heating



(c) lower right wall cooling, center heating

Fig. 3. Comparison of ceiling temperature for the experiment and calculation.

값보다 다소 크게 예측되었는데, 그 이유는 수치해석에서는 완전한 단열조건이나, 실험에서는 완전하게 단열이 되지 않았기 때문으로 판단된다. 수치해석값과 실험값은 8% 이내로 일치하였고, 특히 시간이 경과함에

따라 매우 근접하였다. 그 결과, 천정 중심부에서 열감지기 감지온도 72°C에 도달하는 시간은 수치해석에서는 41분 30초, 실험에서는 42분이었다.

(b)는 전체단열, 좌측코너가열실로서 (a)와 유사하나, 열감지기 감지온도 72°C에 도달하는 시간이, 수치해석에서는 50분, 실험에서는 52분으로 중앙가열 경우보다 약 10분 지연된다.

(c)는 우측벽 밑부분의 1/2이 상온으로 유지되는 중앙가열실로서, 50분까지는 수치해석값이 실험값과 잘 일치하나, 50분 이후에 수치해석값은 거의 일정하나 실험값은 미소하게 계속 증가하여 오차가 발생하였다. 그 이유는 수치해석에서는 상온으로 유지되는 조건이나, 실험에서는 실 내부의 온도가 증가하면서 우측벽의 온도가 상온보다 많이 증가하였다. 수치해석과 같은 조건을 만들려면 우측벽을 냉각시켜서 상온으로 유지시켜야 하는데, 본 실험에서는 그렇게 하지 못하여 차이가 발생하였다. 이 경우는 우측벽으로 열이 손실되어 수치해석에서는 시간이 경과하여도 천정 중심부의 온도가 약 60°C로 열감지기 감지온도 72°C에 도달하지 않았다.

이러한 수치해석과 실험과의 비교에서, 본 수치해석 과정은 매우 적합한 것으로 판단된다.

4.2 전체단열 실의 속도벡터, 유선, 등온선

Fig. 4는 전체단열, 중앙가열실의 속도벡터, 유선, 등온선을 시간이 지남에 따라 비정상상태에서 정상상태까지의 예를 도시한 것이다. 그림 중에 최대속도(V_{max})는 무차원 값이고, 팔호내 값은 참고로 실험장치내의 속도로 환산한 실제속도이다. ψ_{max} 은 식 (7)로 계산한 유동함수중 최대값이다.

유동은 부력에 의하여 위로 상승하며 천정에서 ceiling jet를 형성하여 벽면을 따라 벽을 가열하면서 아래쪽으로 내려간다. 이 유동은 부력에 의해 다시 상승하며 중심축에 대하여 좌우 대칭인 두 개의 와류를 형성한다.

와류의 중심은 초기에 하부에서 점차 상승하여 3분 이후에는 상부에 위치한다. 3분경까지는 속도가 커지나 그 이후 점차적으로 감소하는데, 이것은 상하 온도차가 감소하면서 부력이 감소하기 때문이다.

온도도 유동과 같이 좌우대칭 형태이고, 시간에 따라 실 전체로 확산된다.

Fig. 5는 전체단열, 좌측코너가열실로서 유동은 초기에 좌측코너에서 45° 방향으로 확산되어 간다. 3분부터는 좌측 수직벽을 따라 상승하여 ceiling jet를 형성하며 속도가 감소하여 우측 수직벽을 따라 하강하여 커다란 하나의 와류를 형성한다. 와류의 중심은 초기

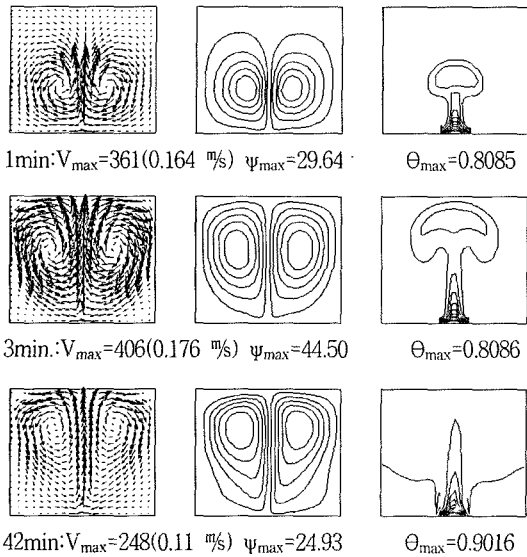


Fig. 4. Velocity vectors, Stream lines and Isothermal lines of full insulation, center heating room.

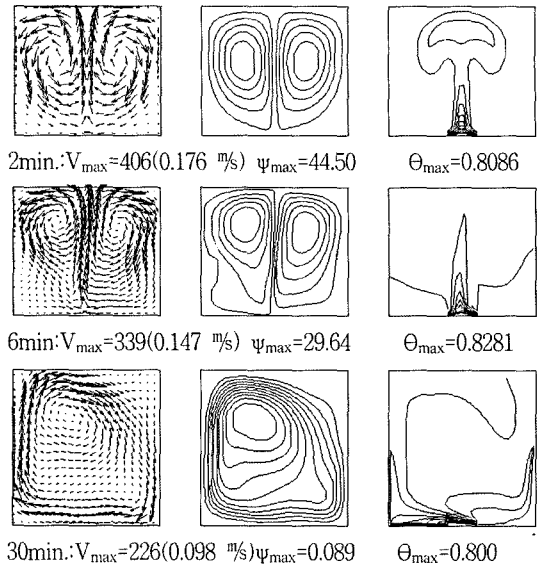


Fig. 6. Velocity vectors, Stream lines and Isothermal lines of right wall cooling, center heating room.

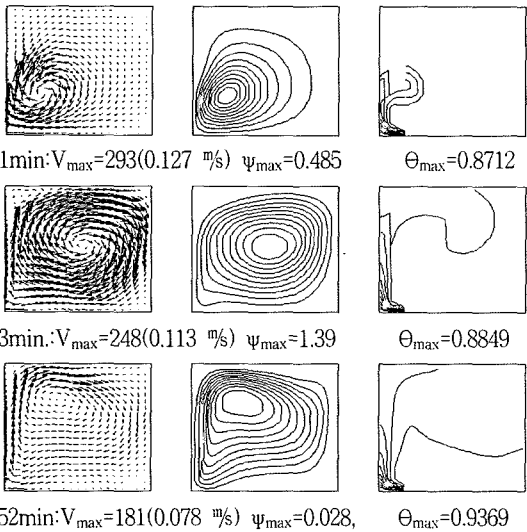


Fig. 5. Velocity vectors, Stream lines and Isothermal lines of full insulation, corner heating room.

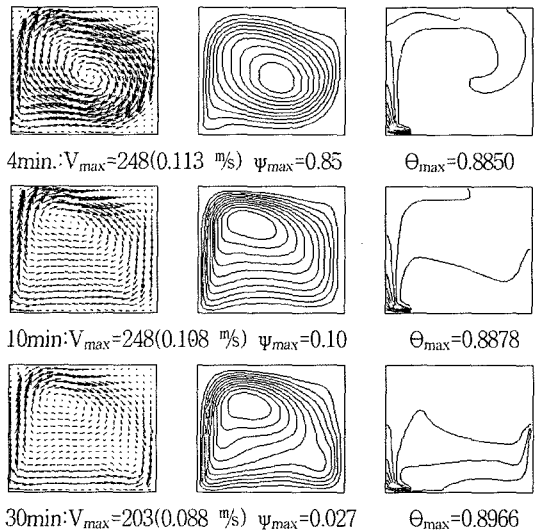


Fig. 7. Velocity vectors, Stream lines and Isothermal lines of right wall cooling, corner heating room.

의 좌측코너에서 점차 상승하여 10분 이후에는 좌측 상부에 위치한다. 온도도 유동과 같이 좌측 수직벽을 따라 온도가 상승한다.

4.3 우측벽 하부 상온 실의 속도벡터, 유선, 등온선

Fig. 6은 우측벽의 하부 1/2이 상온으로 유지된 중앙 가열실이다. 초기에는 Fig. 4의 전체단열, 중앙가열실과 같이 좌우 대칭인 두 개의 와류가 형성되나, 우측

벽 하부의 찬 기류로 유동이 좌측으로 치우치며 20분 경에는 두 개의 와류가 하나로 합쳐져서 Fig. 5와 유사해진다. 그러나 Fig. 5와 달리 바닥에서 강한 기류가 좌측으로 유동한다. 온도도 초기에는 Fig. 4와 유사하나 우측벽의 냉각효과로 등온선이 좌측으로 이동한다.

Fig. 7은 우측벽의 밑부분 1/2이 상온으로 유지된 코너가열실로서, 유동은 Fig. 5의 전체단열 경우와 유사

하나, Fig. 6과 같이 바닥에서 강한 기류가 좌측으로 유동하고, 10분경부터는 우측 하부 코너에 약한 2차 와류가 발생한다.

온도도 초기에는 Fig. 5와 유사하나 우측벽 하부의 냉각효과로 등온선이 실 하부로 이동한다.

4.4 속도 변화

Fig. 8은 높이가 H/2인 실 중심선상에서 Y방향 무차원속도(V)를 시간별로 도시한 것으로, + 값이 위로 상승하는 속도이다. 그림에서 선의 표시는 시간에 따라, 연속된 실선, 긴 점선, 짧은 점선, 점선, 일점쇄선, 이점쇄선 순이다.

(a)는 전체단열, 중앙가열실로서, 실내 중심에서 상승하는 큰 속도와 좌우측에서 바닥으로 하강하는 작은 대칭적인 속도분포를 보인다.

(b)는 전체단열, 좌측코너가열실로서, 실의 좌측에서 최대속도를 보이며, 2분까지는 속도가 증가하나, 그 후에는 점차 감소한다.

(c)는 우측벽 하부 상온, 중앙가열실로서, 초기에는 (a)와 유사하나 크기가 작고, 우측의 찬 기류의 영향으로 최대속도가 점차적으로 좌측으로 이동한다.

(d)는 우측벽 하부 상온, 코너가열실로서, 초기에는 (b)와 유사하나 우측의 찬 기류의 영향으로 속도는 작다.

4.5 온도 변화

Fig. 9는 중앙부 가열이나 코너 가열부에서 Y방향 수직 중심선의 시간별 온도분포이다.

(a)는 전체단열, 중앙가열실로서, 가열부 부근에서 온도구배가 크고 상부로 갈수록 온도가 완만히 감소한다. 시간에 따라 온도가 상승하여 온도구배가 작아진다.

(b)는 전체단열, 좌측코너가열실로서, 가열부 윗부분에서(Y>0.1) 온도가 거의 일정하다.

(c)는 우측벽 하부 상온, 중앙가열실로서, (a)의 전체단열 경우보다 우측벽 하부의 찬 기류로 인하여 온도가 크게 감소하며, 가열부 부근(Y=0.1)에서 최저온도를 보이며 상부로 갈수록 다소 회복한다.

(d)는 우측벽 하부 상온, 좌측코너가열실로서, (c)보다 가열부가 상온의 우측벽에서 멀어 가열부 부근(Y=0.1)의 온도가 다소 증가한다. 그러나 (b)보다 온도가 매우 감소한다. 그림에서, (b), (c)는 가열부의 온도구배가 시간에 따라 크게 변화하지 않으며, 특히 (d)는 거의 일정하다. 또한, (c), (d)는 (a), (b)에 비하여 Y방향 전체적으로 시간에 따른 온도상승율이 작다.

4.6 Nusselt 수

Fig. 10은 식 (5),(6)으로 시간별 평균 Nusselt수(Nu)로서, 실선은 바닥 가열면, 점선은 높이 H/2인 실내 수

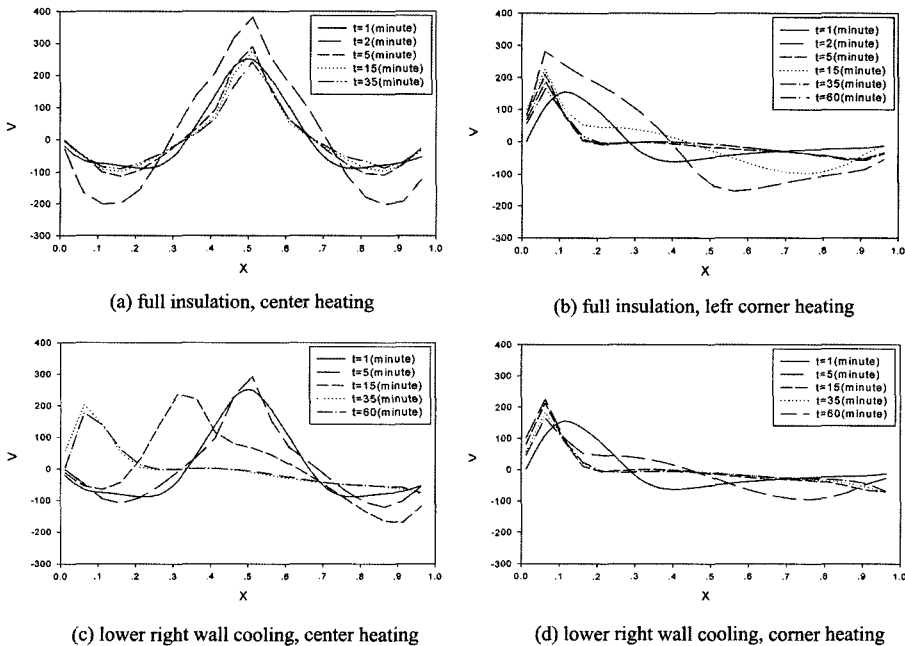


Fig. 8. Variation of v-velocity distribution at the horizontal centerline of room H/2.

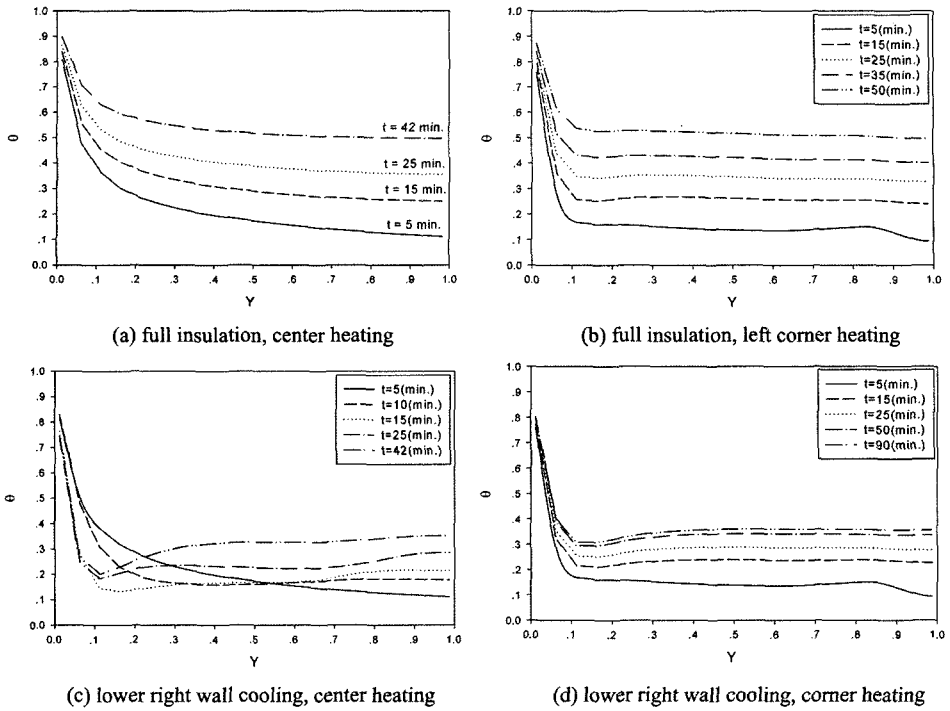


Fig. 9. Temperature gradient along the vertical centerline of heating area.

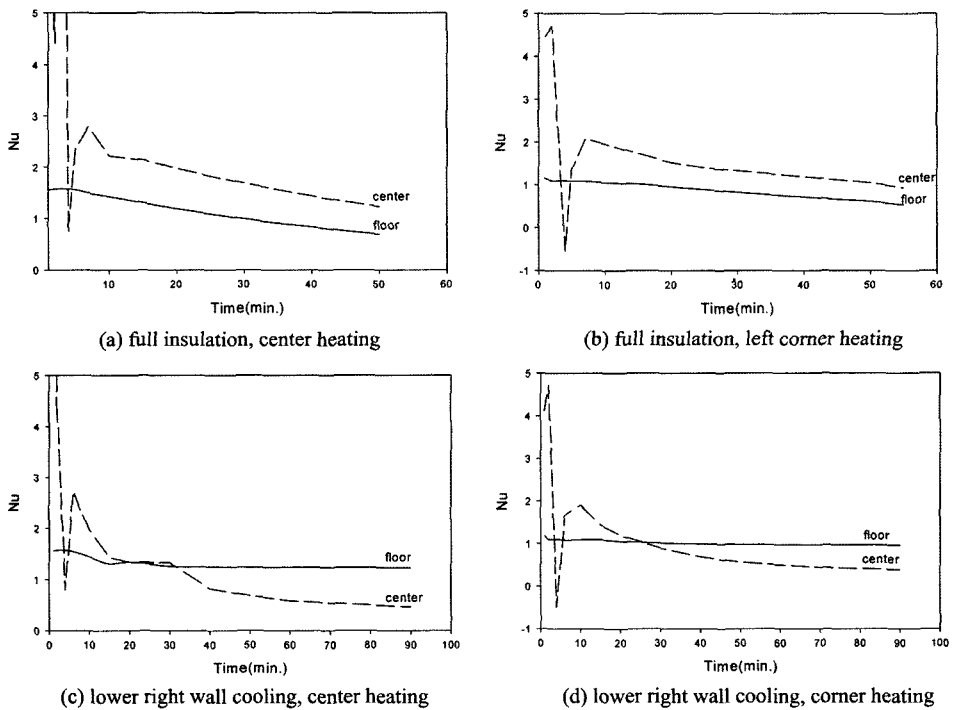


Fig. 10. Variation of Nusselt number.

평중심선의 값이다.

(a)는 전체단열, 중앙가열실로서, 바닥 가열면 Nu 는 시간에 따라 온도구배가 작아져서 점차 감소한다. 수평중심선 Nu 는 초기에는 V 속도변화에 의하여 진동하나, 정상상태에서는 선형적으로 감소하며 바닥 가열면보다 크다.

(b)는 전체단열, 좌측코너가열실로서, (a)와 유사하나 Fig. 9(b)와 같이 가열부 온도구배가 크게 변화하지 않아 Nu 의 변화가 적다.

(c)는 우측벽 하부 상온, 중앙가열실로서, 초기에는 (a)와 유사하나, Fig. 9(c)와 같이 가열부의 온도구배 변화가 적어 Nu 도 1.3 정도로 일정해진다.

수평중심선에서는 4.5절에서와 같이 시간에 따른 온도상승율이 적어 Nu 값이 가열 바닥면보다 작아진다.

(d)는 우측벽 하부 상온, 좌측코너가열실로서, (c)와 유사하나, Fig. 9(d)에서와 같이 가열부의 온도구배가 거의 일정하여 바닥 가열면의 Nu 가 1정도로 일정하다.

그림에서, 중앙가열실이 좌측코너가열실보다 Nu 가 다소 크고, 따라서 대류열전달계수가 크다.

5. 결 론

(1) 전체단열, 중앙가열실은 좌우 대칭인 두 개의 와류, 전체단열, 좌측코너가열실은 한 개의 큰 와류가 형성되며, 와류의 중심은 초기에 하부에서 시간에 따라

상부로 상승한다. 우측벽 하부 상온실은 중앙가열이나 좌측코너가열이나 바닥에서 좌측으로 강한 기류를 갖는 하나의 와류가 형성된다.

(2) 천정 중심부에서 열감지기 감지온도 72°C 에 도달하는 시간은 좌측코너가열실이 중앙가열실보다 약 10분 지연된다.

(3) 중앙가열실이 좌측코너가열실보다 대류열전달계수가 크다. 전체단열실의 수평중심선 Nu 는 바닥보다 크나, 우측벽 하부 상온실은 바닥보다 작다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 충북대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. William D. Walton, ASET-B, "A Room Fire Program for Personal Computers", Fire Technology, Vol. 21, No. 4, pp. 293, November 1985.
2. N. A. Hoffmann and E. R. Galea, "An Extension of the Fire-field Modeling Technique to Include Fire-Sprinkler Interaction", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 6, pp.1445-1457(1993).
3. S. V. Partanker, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing. Co., 1980.